

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ –
ЛАПЛАЗ-2025»**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК:001.89:[621.373.826+533.9+539.2+621.384+530.1+531.761]+378.014(06)

ББК:22.31:72

М 43

XI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2025»: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. – 402 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу XI Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2025», которая пройдет с 29 по 31 января 2025 г. в смешанном формате. Организатором конференции выступает Институт лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ.

Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: лазерная физика и лазерные технологии; физика плазмы и плазменные технологии; сверхсильные лазерные поля; управляемый термоядерный синтез; современные проблемы теоретической физики; современные проблемы физики твердого тела, функциональных материалов и наносистем; ускорители заряженных частиц и радиационные технологии; современные проблемы квантовой метрологии, физика высокой плотности и энергии, электрофизическое и ядерное приборостроение, физика кинетических явлений, массспектрометрия, физика экстремального состояния вещества.

Предназначено для заинтересованных лиц.

Статьи получены до 15 января 2025 г. Материалы издаются в авторской редакции.

Ответственный редактор: Крупышева Полина Олеговна

ISBN 978-5-7262-3135-8

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2025

Подписано в печать 04.02.2025.

Формат 60×84 1/8.

Уч.-изд. л. 50,25

Печ. л. 50,25

Изд. № 005-2.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Программный комитет конференции

Гаранин Сергей Григорьевич – академик РАН, директор Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ - председатель Программного комитета

Кузнецов Андрей Петрович – д.ф.-м.н., директор Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ – зам. председателя Программного комитета

Бармаков Юрий Николаевич – д.т.н., первый заместитель научного руководителя ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, научный руководитель Института физико-технических интеллектуальных систем НИЯУ МИФИ, профессор НИЯУ МИФИ

Гарнов Сергей Владимирович – член-корр. РАН, директор Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, научный руководитель Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ

Губин Сергей Александрович – д.ф-м.н., профессор, заведующий кафедрой химической физики НИЯУ МИФИ

Евтихиев Николай Николаевич – генеральный директор ООО «НТО «ИРЭ-ПОЛЮС», заведующий кафедрой лазерной физики НИЯУ МИФИ

Колачевский Николай Николаевич – член-корр. РАН, директор Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Кудряшов Николай Алексеевич – д.ф-м.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной математики НИЯУ МИФИ

Менушенков Алексей Павлович – д.ф.-м.н., профессор кафедры физики твердого тела и наносистем НИЯУ МИФИ

Полозов Сергей Маркович — д.ф.-м.н., заведующий кафедрой электрофизических установок НИЯУ МИФИ

Попруженко Сергей Васильевич – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой теоретической ядерной физики НИЯУ МИФИ

Черковец Владимир Евгеньевич – д.ф-м.н., профессор

Организационный комитет конференции

Кузнецов А.П. – директор института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ, председатель Организационного комитета

Генисаретская С.В. – заместитель директора института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ, заместитель председателя Организационного комитета

Борисюк П.В. – заведующий кафедрой физико-технических проблем метрологии

Воронова Н.С. – доцент кафедры теоретической ядерной физики

Гаспарян Ю.М. – и.о. заведующего кафедрой физики плазмы

Городничев Е.Е. – профессор кафедры теоретической ядерной физики

Губский К.Л. – доцент кафедры лазерной физики

Гусарова М.А. – доцент кафедры электрофизических установок

Кузнецов А.В. – доцент кафедры физики твердого тела и наносистем

Маклашова И.В. – начальник отдела организационного планирования и международного сотрудничества

Масленников С.П. – профессор кафедры прикладной ядерной физики

Рябов П.Н. – заместитель директора Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ

Тронин И.В. – и.о. заведующего кафедрой молекулярной физики

Содержание

Секция ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	25
Е.В. ДВОРЕЦКАЯ, Р.Б. МОРГУНОВ <u>ЛОКАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ АМОРФИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МИКРОПРОВОДА PrDy-FeCo-B</u>	26
А.П. ЛАСКОВНЕВ, М.И. МАРКЕВИЧ, В.И. ЖУРАВЛЕВА, А.Г. АНИСОВИЧ, Д.Ж. АСАНОВ <u>ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ СМЕСОВОЙ ТКАНИ И КЛАСТЕРОВ ЦИРКОНИЯ ПОСЛЕ ПРЕБЫВАНИЯ ЕГО В УСЛОВИЯХ АНТАРКТИДЫ</u>	27
А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Э.Р. ТОЛОРДАВА, Е.В. УЛТУРГАШЕВА, С.Н. ШЕЛЫГИНА, И.Н. САРАЕВА, С.П. БАБИНА, С. И. КУДРЯШОВ <u>ОЦЕНКА БИОТОКСИЧНОСТИ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ IN-VIVO</u>	28
В.П. БИРЮКОВ, А.Н. МИРЯХА <u>ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКАМИ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ НАПЛАВКЕ</u>	29
В.П. БИРЮКОВ, А.Н. МИРЯХА, А.А. ЯКУБОВСКИЙ <u>ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЗАКАЛКИ СТАЛИ 25 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР ТРЕНИЯ</u>	30
М.Д. ВАСИЛЬЕВ, А.А. МАШАРСКАЯ, А.С. ХРАМОВ, Р.М. МУХСИНОВА, Д.А. СИНЕВ <u>ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ГИБКИХ МАТЕРИАЛАХ КАК ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИЙ</u>	31
Д.В. ВИНОГРАДОВ, Д.А. БЕЛОВ, А.В. ИКОННИКОВ, Р.А. ХАБИБУЛЛИН <u>МИКРОДИСКОВЫЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА МОДАХ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ</u>	32
С.Ю. ГАВРИЛОВ, А.И. ХИРЬЯНОВА, Е.В. ПАРКЕВИЧ <u>МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОГРАММ ТРЕХМЕРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРВОГО РЫТОВСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ</u>	33
А.А. ГРИГОРЬЕВ, А.А. ФРОНЯ, Е.И. МАВРЕШКО, С.В. ГЛИНСКАЯ <u>ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕСОВ АБЛЯЦИИ В МЕДИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ</u>	34
А.Ю. ДАНИЛОВ, Г.Ю. ИВАНОВ, С.П. НИКИТИН <u>ВЫСОКОКОГЕРЕНТНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С РАСШИРЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ, СЕНСОРИКИ И СИСТЕМ ВОЛОКОННОЙ СВЯЗИ</u>	35
М.А. КАРДАПОЛОВА, Н.И. ЛУЦКО, Л.И. ПИЛЕЦКАЯ <u>ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ПОСТУПАЮЩЕЙ В ЕДИНИЧНЫЙ ВАЛИК НА ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ САНИРОВАНИЕМ</u>	36
С.С. АНУФРИК, А.П. ВОЛОДЕНКОВ, К.Ф. ЗНОСКО ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ЭКСПЛЕКСНОГО ЛАЗЕРА С ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИЕЙ 3 Дж	37
К.Ф. ЗНОСКО, В.Ч. БЕЛАШ ИСТОЧНИКИ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ В СМЕСЯХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С ГАЛОГЕНОНОСИТЕЛЕМ	38
М.В. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ, Я.В. ГРУДЦЫН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ ГИБРИДНОЙ (СУБ)ПИКОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ~10 МКМ	39
Я.В. ГРУДЦЫН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ МНОГОЧАСТОТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО УФ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	40
А.Н. КОЗЛОВ, И.В. СОЗАЕВ, Д.И. ЦЕЛИКОВ, Г.В. ТИХОНОВСКИЙ, А.А. ПОПОВ, С.М. КЛИМЕНТОВ ЛАЗЕРНО-АБЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ТАНТАЛА ДЛЯ БИНАРНЫХ БИОМЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ	41

КОЛЕСНИКОВ Н.М., ГУБСКИЙ К.Л., ЛУКЬЯНОВ К.С., ТИЩЕНКО И.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ КОАКСИАЛЬНОГО АИПД МЕТОДАМИ ГЕТЕРОДИННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ	42
А.В. КОЛЧИН, С.А. КОЗЮХИН ФЕМТОСЕКУНДНОЕ ЛАЗЕРНОЕ АНИЗОТРОПНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК Ge ₂ Sb ₂ Te ₅	43
П.С. КУЛЕШОВ ДВУХСТАДИЙНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ	44
А. С. АБРАМОВ, В. А. ЛАПИН, П. П. МИРОНОВ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ С СЛАБОЙ АМПЛИТУДНОЙ И СИЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В ПРОДОЛЬНО НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ	45
А.А. ЛИСКОВИЧ ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ФАКЕЛОВ АЛЮМИНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ.....	46
А.А. ЛИСКОВИЧ УСИЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ МЕТАЛЛОВ В СРЕДЕ ГЕЛИЯ.....	47
Е.И. МЕЗЕНИН, В.А. СТЕПАНОВ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИК НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ЦИРКОНИЯ И АЛЮМИНИЯ.....	48
С.С. ЛЮБИН, М.А. МУРЗАКОВ, И.И. РЯШКО_СОЗДАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ТРАВЛЕНИЯ.....	49
И.Р. ОВСЯНКИН, Ф.В. ФУНТОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, В.Д. МИРОНОВ, П.С. ДЖУМАЕВ, В.И. ПОЛЬСКИЙ, Е.С. ЕРМИЛОВА ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ NiZnAl ₂ O ₃ , СОЗДАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРА...50	
Е.А. ОРЛОВА, Д.С. САМОХИН, А.Е. СОЛОМАТИН ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ LAES ЗАЛЕЧИВАНИЯ В СВИНЦЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА СТАЛИ 16Х12ВМСФБР	51
С.Е. ПАНИН, Р.В. СМИРНОВ, А.К. КУТУКОВ, А.Н. БОЙКО, Е.А. ПЕГАНОВ, А.А. СЕРГЕЕЧЕВ ИЗМЕНЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКЕ	52
ПАРКЕВИЧ Е.В., ШПАКОВ К.В., ХИРЬЯНОВА А.И., ГАВРИЛОВ С.Ю. ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР И МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	53
И.Р. ОВСЯНКИН, Ф.В. ФУНТОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.В. ПЛАТОНОВ, А.А. ТИМОФЕЕВ, Е.С. ЕРМИЛОВА ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЯ NiZnAl ₂ O ₃ , СОЗДАННОГО С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ	54
Н.С. ПОКРЫШКИН, В.Г. ЯКУНИН, В.Н. МАНЦЕВИЧ, А.М. СМИРНОВ, В.Ю. ТИМОШЕНКО АПКОНВЕРСИОННАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ	55
С.А.ПОРТНОВ, С.С.ШАЛЯПИН, А.О.БОГОРОДСКИЙ, В.И.БОРЩЕВСКИЙ, М.А.ШЕВЧЕНКО ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРЫХ ГАРМОНИК НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛАГЕНА В ЛЁГКИХ МЫШЕЙ	56
А.В. РЕБЕЗОВ, А.В. МИХАЙЛЮК, И.Ю. ТИЩЕНКО К.Л. ГУБСКИЙ ГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТОЛА ЭЛЕКТРОННОГО ЛИТОГРАФА.....	57
С.В. ВАСИЛЬЕВ, А.Л. СИТКЕВИЧ ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	58

Е.В. УЛТУРГАШЕВА, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Э.Р. ТОЛОРДАВА, С.Н. ШЕЛЫГИНА, С.П. БАБИНА, И.Н. САРАЕВА, С.И. КУДРЯШОВ EX VIVO ИССЛЕДОВАНИЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ	59
А.В. ЧАПЛЫГИН, М.Ю. ЯКИМОВ, И.В. ЛУКОМСКИЙ, С.С. ГАЛКИН, М.А. КОТОВ, А.Н. ШЕМЯКИН, Н.Г. СОЛОВЬЕВ, А.Ф. КОЛЕСНИКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКА ПЛАЗМЫ И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	60
М.Д. ЧЕБАН, С.А. ФИЛАТОВА, Д.Н. МАМОНОВ, К.А. ЩЕРБАКОВ, П.В. ПАРАБИН <u>ЛАЗЕРНАЯ</u> ДЕЗАКТИВАЦИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ.....	61
Е.Д. ЧИВИЛИС, А.П. БОГАТОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, С.А. ЗИБРОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ АНОМАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СПЕКТР ИЗЛУЧАЮЩЕГО С ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРА.....	62
ШАЛЯПИН С.С., ПОРТНОВ С.А., БОГОРОДСКИЙ А.О., БОРЩЕВСКИЙ В.И., ШЕВЧЕНКО М.А. ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАТОГЕНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕРАЦИЯХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЕЙ	63
А.Е. ШЕПЕЛЕВ, С.А. СОЛОХИН, М.Н. ЕРШКОВ, А.А. АНТИПОВ, А.Г. ПУТИЛОВ УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	64
А.А. ШКУНДИЧ, Е.С. КОРШАК, М.П. ПАТАПОВИЧ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ С ТРЕБУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	65
П.И. ШУПАН СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ, ОБРАЗОВАННОЙ СДВОЕННЫМИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ	66
П.И. ШУПАН, С.Д. ЛЕЩИК СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ В ИНЖЕКТИРУЕМОЙ В ЖИДКОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ	67
А.В. ЩУКО, Н.Х. ЧИНЬ, М.П. ПАТАПОВИЧ ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В БИООБРАЗЦАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСЫХАНИЯ МЕТОДОМ АТОМНО- ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ	68
Е. В. БОРИСОВ, И.В. ГАЛУШКА, А. А. КОЗЫРЕВ, М. А. КОПЁНКИН, О. В. КОRENЧЕНКО, В. А. ПАНАРИН, С. Н. СОКОЛОВ, М. Ю. СТАРЫНИН, Л. И. ШЕСТАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ	69
Д.В. БАДИКОВ, А.А. ИОНИН, М.В. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.М. САГИТОВА Е.П. ФЕДОРОВА ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ СО-ЛАЗЕРА В КРИСТАЛЛЕ BaHgGeSe4	70
М.В. ВИНОКУРОВ, Р.А. ХАБИБУЛЛИН МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ КВАНТОВО- КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПЕРВОГО ПОРЯДКА	71
Н.В. ГРЕЧИХИН, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С УЧЕТОМ ЖИДКОЙ ФАЗЫ	72
Е.С. ЕРМИЛОВА, О.И. БАЙЦАЕВА, В.А. АНДРЕЕВА, М.В. МУРАШКИНА ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОНА БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ТУЛИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА (TFL) С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1,94 МКМ ДЛЯ ЭНДОСКОПИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ «СЛОЖНОГО» ХОЛЕДОХОЛИТИАЗА .	73
Х.САЛЕХ, Ю.А.КОНИН, А.А.ПЕТРОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗОН В ОБЪЕМЕ СТЕКЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ.....	74
А.А. СВИРИДОВА, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ НАНОСЕКУНДНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	75

И.В. ШВАРЦ, А.Х. ГИЛЬМУТДИНОВ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕР-НОГО ВЫРАЩИВАНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ .76	
И.А. БУЛЫЧОВ, К.Н. МАКАРОВ, В.А. ОСТРОВСКИЙ, М.В. ПУТИЛИН ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ В YB:YAG ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЕ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ.....77	
А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, М.В. НЕРОДА, Б.Г. ХОЛОДАРЬ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 10Г2 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ НА ИЗГИБ78	
М.С. ВОРОБЕЙ, Т.И. КОЗЛОВА, К.Л. ГУБСКИЙ РАЗРАБОТКА ОДНОЧАСТОТНОГО ВОЛОКОННОГО ЭРБИЕВОГО ЛАЗЕРА.....79	
Г.Н. ДУБРОВИН, П.Е. САМАРИН ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1064 И 532 НМ ДЛЯ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАМИНАРНУЮ СТРУЮ ВОДЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ДЛИНЫ СТРУИ.....80	
И.О. КОЖЕВНИКОВ, А.А. СЕРДОБИНЦЕВ, Е.С. ПРИХОЖДЕНКО ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕДНОГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ ГИБКИХ ПОДЛОЖЕК ИЗ ПОЛИИМИДА.....81	
КИРЕЕВ С.В., КОНДРАШОВ А.А., КУСМАНКУЛОВ Б., МАРШИН Н.А., ГИЛЬМУЛЛИН А.Р. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ АДАПТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ (СИГНАЛОВ), ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА TDLAS, ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ82	
А.П. ПИЛИПЧУК, О.Г. ДЕВОЙНО РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ.....83	
В.И. ПИЧИЕНКО, В.Д. ВОРОНОВ Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, Е.Н. БЛИНОВА, М.А. ЛИБМАН ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ В СИСТЕМАХ Fe-Cr-Ni ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ84	
Д.И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА ДВОЙНУЮ ИОНИЗАЦИЮ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ИНТЕНСИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ85	
В.В. БУЛГАКОВА, П.А. ЧИЖОВ, А.А. УШАКОВ, П.В. РАТНИКОВ, Ю.Г. ГОНЧАРОВ, А.К. МАРТЬЯНОВ, В.В. КОНОНЕНКО, С.С. САВИН, И.В. ГОЛОВНИН, В.И. КОНОВ, С.В. ГАРНОВ ДИАГНОСТИКА ДИНАМИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ В АЛМАЗАХ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ – ТЕРАГЕРЦОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ86	
В.С. ЦВЕТКОВ Е.А. ДОБРЕЦОВА, Ю.Л. КАЛАЧЕВ, А.А. КРАВЦОВ, О.М. ЧАПУРА, В.А. ТАРАЛА, Е.В. МЕДЯНИК, Л.В. ТАРАЛА, В.Е. СУПРУНЧУК, Ф.Ф. МАЛЯВИН, С.В. КУЗНЕЦОВ, В.А. ЛЯПИН СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ ЛЮТЕЦИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА, АКТИВИРОВАННОЙ ИОНАМИ ЭРБИЯ87	
Ю.А. ЧИВЕЛЬ МЕТОД ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ88	
В.В. КОНОНЕНКО, Т.В. КОНОНЕНКО А.А. КУПРИЯНОВ, В.П. ПАШИНИН Е.В. ЗАВЕДЕЕВ, М.С. КОМЛЕНКО, Н.Д. КУРОЧИЦКИЙ, В.И. КОНОВ, А.Т. САЛКОЗАНОВ, А.С. ГУСЕВ, Н.И. КАРГИН, С.Я. КИЛИН ОДНОЧНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ NV ЦЕНТРЫ В АЛМАЗЕ89	
Секция МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА90	
А.В. АКСЕНОВ, А.Д. ПОЛЯНИН СИММЕТРИИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, РЕДУКЦИИ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ ТИПА МОНЖА – АМПЕРА91	
А.Д. ПОЛЯНИН, Н.А. КУДРЯШОВ ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ И РЕДУКЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА С ПОТЕНЦИАЛОМ и ДИСПЕРСИЕЙ ОБЩЕГО ВИДА92	
А.В. ПОРУБОВ НЕЛИНЕЙНЫЕ УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАМАТЕРИАЛЕ93	
С.Ю. ДОБРОХОТОВ, В.Е. НАЗАЙКИНСКИЙ, А.В. ЦВЕТКОВА ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПУЧКИ БЕССЕЛЕВОГО ТИПА И ЛАГРАНЖЕВЫ МНОГООБРАЗИЯ94	

В.В. ВЕДЕНИЯПИН, Я.Г.Батищева, Н.Н. Фимин, В.М. Чечёткин МАТЕМАТИКА ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КОСМОЛОГИЯ: УРАВНЕНИЯ ВЛАСОВА И КОНСТАНТА ХАББЛА	95
В.Г. СОРОКИН ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРЯМЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В УСЛОВИЯХ НЕУСТОЙЧИВОГО СТАЦИОНАРНОГО РЕШЕНИЯ.....	96
З.Н. ХАКИМОВА, О.В. ЗАЙЦЕВ ДИСКРЕТНЫЕ СИММЕТРИИ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДРОБНО-ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ВИДА В ТРАНСЦЕНДЕНТАХ ПЕНЛЕВЕ	97
Е.П. КУБЫШКИН БИФУРКАЦИИ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ С ОПЕРАТОРОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АРГУМЕНТА И ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В НЕЛИНЕЙНОМ ФУНКЦИОНАЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ	98
С.Ф. ЛАВРОВА, Н.А. КУДРЯШОВ ПАРЫ ЛАКСА И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ РЕДУКЦИЙ УРАВНЕНИЙ ИЕРАРХИИ ГАРРИ ДИМА К ПЕРЕМЕННЫМ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ	100
К.В. БРУШЛИНСКИЙ, В.В. КРЮЧЕНКОВ, Е.В. СТЁПИН ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СТРОГОГО РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В ДВУМЕРНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШЕК.....	101
Д.Р. НИФОНТОВ, Н.А. КУДРЯШОВ ФУНКЦИЯ ГРИНА ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ДИССИПАТИВНОГО ЛИНЕЙНОГО ЭВОЛЮЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОРЯДКА	102
О.А. ФУГА, Д.Р. НИФОНТОВ, Н.А. КУДРЯШОВ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ, ПЕРВЫЕ ИНТЕГРАЛЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБОБЩЁННОГО УРАВНЕНИЯ САСА-САТСУМЫ.....	103
В.С. ДРЮМА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕГРИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА	104
В. В. ЦЕГЕЛЬНИК О РЕШЕНИЯХ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА	105
Е.А. ЖУКОВА, Н.А. КУДРЯШОВ, А.А. КУТУКОВ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ИЕРАРХИИ БЮРГЕРСА, ВЫРАЖЕННЫЕ ЧЕРЕЗ ОБОБЩЕННЫЕ ГИПЕРГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ	106
А.Н. КУЛИКОВ, Д.А. КУЛИКОВ ВОЛНОВОЙ РЕЛЬЕФ В РАМКАХ НЕЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЭРОЗИИ	107
А.В. ТЕТЕРЕВ, И.М. КОЗЛОВ, Л.В. РУДАК, Н.И. МИСЮЧЕНКО КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕГКОГАЗОВОЙ МЕТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ...	108
Н.В. КУЗНЕЦОВ, Т.Н. МОКАЕВ, М.М. АНИКУШИН, А.О. РОМАНОВ ЛОКАЛИЗАЦИЯ СКРЫТЫХ КОЛЕБАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ.....	109
Ю.Н. ГРИГОРЬЕВ, Е.И. КАПЦОВ, С.В. МЕЛЕШКО ГРУППОВОЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ БИНАРНОЙ СМЕСИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ	110
А.И. ЗЕМЛЯНУХИН, Н.А. АРТАМОНОВ, В.А. БОЧКАРЕВ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗНАКА КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА НА ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛН ДЕФОРМАЦИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ	111
О.В. БЛИНКОВА, Д.В. КОНДРАТОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ВИБРООПОРЫ С ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ	112
В.С. ПОПОВ, А.А. ПОПОВА, А.В. ЧЕРНЕНКО ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТЕНКИ НА НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОМ ПОДВЕСЕ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ВИБРИРУЮЩИМ ШТАМПОМ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ.....	113
А.В. БОЧКАРЕВ, М.Ю. ГОРСКИЙ ПРОБЛЕМА ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ ПРИ ОБРАТНОМ РАСЧЕТЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	114
С.П. БАУТИН, И.А. ВАЗИЕВА ПРИМЕНЕНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ	115

С.П. БАУТИН, А.Г. ОБУХОВ ПРИМЕНЕНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ С ЧАСТНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ.....	116
Д.А. ПЧЕЛКИНА, А.В. КАПУСТИН КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОПОДАТЛИВОГО ОРТЕЗА КОЛЕННОГО СУСТАВА ЧЕЛОВЕКА В СРЕДЕ САЕ MBD	117
А.О. КАЗАЧИНСКИЙ, И.Ю. КРУТОВА МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ТИПА ТОРНАДО..	118
С.Г. КЛИМАНОВ, А.В. КРЯНЕВ, В.А. ТРИКОЗОВА, Д.Д. ЦАРЕВА ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗНАЧЕНИЯХ ТЕКУЩИХ ПОКАЗАНИЙ ПАЦИЕНТА ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ (ИВЛ) С ПОМОЩЬЮ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПОЛИНОМОВ	119
Е.В.КОРОТКОВ, М.А.КОРОТКОВА ДИСПЕРСНЫЕ ПОВТОРЫ В ГЕНОМАХ РАЗЛИЧНЫХ БАКТЕРИЙ.....	120
В.М.РУДЕНКО, Е.В.КОРОТКОВ ОБНАРУЖЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ПОВТОРОВ В РАСТИТЕЛЬНЫХ ГЕНОМАХ С ПОМОЩЬЮ IP МЕТОДА.....	121
К.Е. ШИЛЬНИКОВ ОБ ОДНОЙ СХЕМЕ ГОДУНОВСКОГО ТИПА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ НА АДАПТИВНЫХ СЕТКАХ	122
С.А. ЛАДЫГИН, Р.Н. КАРАЧУРИН, К.Е. ШИЛЬНИКОВ, П.Н. РЯБОВ О ПРИМЕНЕНИИ ПОДВИЖНЫХ СЕТОК К ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ СХЕМАМ ДЛЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.....	123
Э.М. УЛЬМАСКУЛОВ, К.Е. ШИЛЬНИКОВ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ДЛЯ СИСТЕМ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ НА КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЙ СЕТКЕ НЕСОГЛАСОВАННОЙ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА СРЕД.....	124
А.Г. ГОЛОВКОВ, П.Н. РЯБОВ, Н.А. КУДРЯШОВ О ЧИСЛЕННОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ ЧАВИ-ВАДДИ-КОЛОКОЛЬНИКОВА	125
А.Р. ЛИМАН, М.А. ЧМЫХОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ В ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА OPENFOAM.....	126
Т.В. ЛИСЕЙКИНА ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ МИШЕНИ, ИОНИЗОВАННОЙ БИХРОМАТИЧЕСКИМ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ	127
Секция ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ	128
Е.А. КАШИКБАЕВ, Б.Ж.ЧЕКТЫБАЕВ, Д.А. ОЛЬХОВИК, О.А.СТЕПАНОВА, А.Ж. ДУЙСЕН, А.А ЖАКСЫБАЕВА РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА ТОКАМАКА КТМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	129
Е.Ю. ТУЛУБАЕВ, В.Н. КУДИЯРОВ, И.Л. ТАЖИБАЕВА, А.В. ВЕРТКОВ, М.Ю. ЖАРКОВ, Ю.Н. ГОРДИЕНКО, Ю.В. ПОНКРАТОВ, В.С. БОЧКОВ, А.Н. СЛУЯНОВ ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МАКЕТА ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА НА ОСНОВЕ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	130
Е.Д. МАРЕНКОВ, Е.Г. КАВЕЕВА, И.Ю. СЕНИЧЕНКОВ, А.А. ПШЕНОВ, П.С. СЕМЕНОВ, А.В. ГОРБУНОВ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОДА SOLPS 5.2 И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОКАМАКА Т-15МД В ЭТОМ КОДЕ	131
А.А. СТЕПАНЕНКО МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕСЬЮ ЛИТИЯ В ТОКАМАКЕ Т-15МД.....	132
А.А. СТЕПАНЕНКО ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ ПРИ ИХ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ОБЛАСТЬ РЕЗОНАНСНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЕРИФЕРИИ ТОКАМАКА	133
Н.В. КОРШУНОВ РАЗРАБОТКА СВЕРХМАЛОШУМЯЩЕЙ, ШИРОКОПОЛОСНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ С ВЫСОКИМ КОЭФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ ДЛЯ ИОННОГО ДЕТЕКТОРА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ	134

Н.С. СЕРГЕЕВ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПОЛОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ КВАЗИКОГЕРЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-10 ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ	135
А.С. ДРОЗД, Д.С. СЕРГЕЕВ, Р.А. БЕГИШЕВ, Т.Б. МЯЛТОН, К.А. РОГОЗИН Д.В. САРЫЧЕВ НАБЛЮДЕНИЕ МГД НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ПИЛООБРАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-15МД С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА	136
ИЗАРОВА А.Д., БАЛАШОВ А.Ю., ДРОЗД А.С., БЕЛОВ А.М., ЕЛИСЕЕВ Л.Г., САРАНЧА Г.А., СТЁПИН А.В., СУШКОВ А.В. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МГД-ДИАГНОСТИКИ Т-15МД	137
А.А. ЛОГИНОВ Д.А. ШЕЛУХИН, В.А. ВЕРШКОВ, И.А. ВЛАДИМИРОВ РАБОЧАЯ ОБЛАСТЬ И СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ-ШУМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ Т-15МД В РЕЖИМАХ ЗОНДИРОВАНИЯ НА О- И Х-ВОЛНЕ	138
А.И. АРИСТОВ, В.И. ТЕПИКИН, П.В. САВРУХИН, Е.А. ШЕСТАКОВ, П.Д. ЛИСОВОЙ, А.В. ХРАМЕНКОВ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРИ РАЗВИТИИ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД.....	139
В.И. ТЕПИКИН, П.В. САВРУХИН, Е.А. ШЕСТАКОВ, А.И. АРИСТОВ, П.Д. ЛИСОВОЙ, А.В. ХРАМЕНКОВ ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	140
С.Н. СТОЛБОВ, А.В. ОГИНОВ, В.А. ВАРЛАЧЕВ, И.М АНФИМОВ, С.П. КОБЕЛЕВА, НЕКРАСОВ, Ю.В. ДРОБЫШЕВСКИЙ, А.В. КОРЖЕНЕВСКИЙ КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С НЕЙТРОННЫМ ПРОГРЕВОМ ($^3\text{He}-\text{D}-\text{T}$) ПЛАЗМЫ	141
А.Г. МОЗГОВОЙ ЖИДКОСОЛЕВОЙ РЕАКТОР НА ПРИРОДНОМ УРАНЕ С ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ	142
С.В. КУЗНЕЦОВ ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЙ ТОКИ ИОННО-ЗВУКОВОГО СОЛИТОНА.....	143
Р. А. ЯХИН, С. Ю. ГУСЬКОВ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМЕ МАЛОПЛОТНОГО ПОРИСТОГО ВЕЩЕСТВА	144
М.А. АЛХИМОВА, И.Ю. СКОБЕЛЕВ, С.Н. РЯЗАНЦЕВ Т.А. ПИКУЗ ДИАГНОСТИКА ВЕЩЕСТВА С ПЛОТНОСТЬЮ ЭНЕРГИИ $\sim 1 \text{ ГДж}/\text{см}^3$, ФОРМИРУЕМОГО ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТИЧСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	145
М.В. СЕДОВ, С.Н. РЯЗАНЦЕВ, И.Ю. СКОБЕЛЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АРГОНОВСКИХ МИКРОСТРУКТУР ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ МОЩНЫМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ.....	146
С. Н. РЯЗАНЦЕВ, И. Ю. СКОБЕЛЕВ РОЛЬ ПОЛЕВОЙ ИОНИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА РЕЛЯТИВИСТКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ С ВЕЩЕСТВОМ С ВЫСОКИМ ЗАРЯДОМ АТОМНОГО ЯДРА	147
Н.Е. АНДРЕЕВ В.С. ПОПОВ, И.Р. УМАРОВ , О.Н. РОЗМЕЙ ЧАСТИЦЫ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРА С ВЕЩЕСТВОМ	148
Р.К. КУЛИКОВ, С.С. МАКАРОВ, И.Ю. СКОБЕЛЕВ РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.149	
М. П. ФИЛИМОНЧУК, К. А. ИВАНОВ, С. А. ШУЛЯПОВ, Д. А. ГОРЛОВА, И. Н. ЦЫМБАЛОВ, И. П. ЦЫГВИНЦЕВ, Р. В. ВОЛКОВ, А. Б. САВЕЛЬЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОСЛОЙНЫХ ЖИДКОСТНЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ	150
А.К. КУТУКОВ, С.Е. ПАНИН, А.А. СЕРГЕЕЧЕВ, М.А. МИЛЛЕР, Г.А. ЗЕМЦОВ М.В. ПЕТРАКОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 40Х13 И 30ХГСА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ.....	151
А.К. ВОРОНА, А.Е. ЕВСИН, Н.А. ПУНТАКОВ, С.С. ДОВГАНЮК, Н.О. САВВИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИИ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ В АНОДНОМ РЕЖИМЕ	152

А.К. РАЛЬНИКОВ, А.Е. ЕВСИН, Д.А. МЕЛЬНИКОВ, Н.О. САВВИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ ПОВЕДЕНИЕ ВОДОРОДА В ЦИРКОНИЕВОМ СПЛАВЕ Э110 ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СЛОЕВ В ПЛАЗМЕ И ПРИ ВЫДЕРЖКЕ ОБРАЗЦОВ С НАСЫЩЕННОЙ УГЛЕРОДОМ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ПЕРЕГРЕТОМ ПАРЕ.....	153
А.В. БЕРНАЦКИЙ, И.В. КОЧЕТОВ В.В. ЛАГУНОВ, В.Н. ОЧКИН ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ МОЛЕКУЛ ВОДЫ И КИСЛОРОДА В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ ПРИ УЧАСТИИ ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВОЙ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ	154
П.И. ПЕТRENKO, А.А. СТЕПАНЕНКО, А.В. ПЕРЕСЛАВЦЕВ, А.В. АРTEMОV, С.А. ВОЩИНИН, Н.С. ЧЕМОДАНОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ	155
П.И. ПЕТRENKO, А.В. ПЕРЕСЛАВЦЕВ, А.В. АРTEMОV, С.А. ВОЩИНИН, Н.С. ЧЕМОДАНОВ ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОСТИ	156
Н. К. ТАКУШ, В. А. СТРЕКАЛОВ, Р.Н. КАШАПОВ РАЗРАБОТКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	157
Б. КАК, Е. Е. БАРМИНОВА О РАДИАЦИОННОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В ИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ EBIS (EBIT)	158
И.М. КОСТЬШИНА, Б. КАК, Е. Е. БАРМИНОВА ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОКОЙ ВОЛНЫ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ БАРЬЕРОМ	159
О.В. ПЕЛИПАСОВ, О.В. КОМИН, В.А. ЛАБУСОВ ТЕМПЕРАТУРА И ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ, ПОДДЕРЖИВАЕМОЙ ВОЛНОЙ H_{01} ТИПА В СВЧ РЕЗОНАТОРЕ	160
И.Ж. БУНИН, М.В. РЯЗАНЦЕВА, И.А. ХАБАРОВА ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	161
А.В. АРУСТАМОВ, И.Х.ХУДАЙКУЛОВ, В.П. ХАРЯКОВ. СОЗДАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В ВАКУУМНОМ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ.....	162
А.В. АРУСТАМОВ, И.Х.ХУДАЙКУЛОВ, В.П. ХАРЯКОВ. ЗАРЯДОВАЯ СИСТЕМА В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ.....	163
А.В. АРУСТАМОВ, И.Х.ХУДАЙКУЛОВ. В.П. ХАРЯКОВ. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ И ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ	164
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ.....	165
Д.А. АБИН, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, А.Ю. МАЛЯВИНА, И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, Р.Г. БАТУЛИН, П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ МАГНИТНЫХ ИОНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП КОМПОЗИТОВ	166
Ю.В. АГРАФОНОВ, И.С. Петрушин, Д.В. Халаимов, И.В. Безлер, Р.Ю. ЛЕОНТЬЕВ АППРОКСИМАЦИЯ ПЕРКУС-ЙЕВИКА ПРЯМОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ГРАНИЧНЫХ СЛОЁВ ЖИДКОСТЕЙ	167
Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, И.В. МАРТИРОСЯН, М.А. ОСИПОВ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, С.В. ПОКРОВСКИЙ МАГНИТО-ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИНОГО ВТСП ПОДШИПНИКА	168
М.В. БАЛАКИНА, А.Ю. МАЛЯВИНА, А.А. МИХАЙЛОВ, К.А. БОРОДАКО, Д.А. АБИН, С.В. ПОКРОВСКИЙ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СБОРОК НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ	169

Н.А. БОНДАРЕВ, К.А. БОРОДАКО, Н.Н. ТАТАРНИКОВ, А.В. ШЕЛЯКОВ ХОЛОДНОКАТАНЫЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА TiNiCu С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ	170
К.А. БОРОДАКО, И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ, С.В. ВЕСЕЛОВА, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ	171
С.В. ВЕСЕЛОВА, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, К.А. БОРОДАКО, Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В ЭЛЕМЕНТАХ СПИН	172
И.С. ВОЛОХОВ, М.П. ТЕЛЕНКОВ, Ю.А. МИЯГИН ВЛИЯНИЕ МЕЖУРОВНЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ В КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОКАХ С ПРОДОЛЬНЫМ ОГРАНИЧИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ.....	173
С.А. ВОТЯКОВ, А.В. ОСАДЧИЙ НАБОР PSEUDO-SAMO СОСТОЯНИЙ В ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ	174
В.И. ГЕРАСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, В.А. КАШУРНИКОВ РАСЧЕТ КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ	175
А.В. ГЛИНСКИЙ, А.В. НЕХОРОШЕВ, Х.М. КОЗЫРЕВ, А.Л. ГОНЧАРОВ, А.А. БЕЗБЕРДА. ДВУХПРОВОЛОЧНОЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ АДДИТИВНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	176
М.Д. ГРИЦКЕВИЧ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, Д.В. ФОМИНСКИЙ КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОПОКРЫТИЙ MoS _x /a-C(S,H) СО СТАЛЬНЫМ КОНТРТЕЛОМ ПРИ ТРЕНИИ.....	177
К.С. ГРИШАКОВ, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО КЛАСТЕРЫ АЗИДОФУЛЛЕРОНОВ И АЗОТНО-УГЛЕРОДНЫЕ ГЕТЕРОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ	178
К.С. ГРИШАКОВ, А.Д. МУСТАФИН, И.С. ВАСИЛЬЕВСКИЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ ПРИ НАЛИЧИИ МЕХАНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ НАНОВСТАВОК.....	179
Г.И. ЗЕБРЕВ РАДИАЦИОННЫЙ ШУМ КОСМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И СТАТИСТИКА МНОЖЕСТВЕННЫХ СБОЕВ В ЦИФРОВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ	180
Г.В. ИСУПОВ, П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ КИНЕТИКИ РЕЛАКСАЦИИ В СВЕРХПРОВОДНИКЕ С УЧЕТОМ НЕРАВНОВЕСНЫХ ФОНОНОВ	181
А.А. КАЗЬМИН ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ СОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦЫ.....	182
А.А. КАЗЬМИН, А.В. ЗЕЛЕНКО МЕДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ СОДЕРЖАЩИЕ НАНОЧАСТИЦЫ	183
А.В. КАЛАШНИКОВ, М.А. ТОМАЕВА, А.В. КРАСАВИН, В.Д. НЕВЕРОВ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СМЕШАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКА В РАМКАХ ПРИБЛИЖЕНИЯ БОГОЛЮБОВА-ДЕ ЖЕНА	184
Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Д. ЧЕРТОВА, А. ЗАЧИНЯЕВ, С.И. РУПАСОВ, Е.А. БАШКИРОВ, Е.А. ЛЕВАШОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ СО СТРУКТУРОЙ МАХ- И МАВ-ФАЗ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВС-ПОРОШКОВ.....	185
А.В. КЛАУЗ, С.В. РОГОЖКИН, А.А. ХАЛЯВИНА, А.А. БОГАЧЕВ, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ КОМПЛЕМЕНТАРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ	186

А.В. КОРОТКИХ, П.Ф. КАРЦЕВ РАСЧЁТ МНОГОЧАСТИЧНОЙ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕЙ АБРИКОСОВА В ИНТЕРТИПНОМ СВЕРХПРОВОДНИКЕ В РАМКАХ ТЕОРИИ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ	187
А.Е. КРЮКОВА, П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СМЕСИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ.....	188
Д.О. КУЗОВКОВ, П.А. СМИРНОВ, Я.С. ЛЕБЕДЕВА, К.Г. НИКИТИН, М.Е. ФЕДЯНИНА, С.А. КОЗЮХИН, И.А. БУДАГОВСКИЙ, М.П. СМАЕВ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ТЕЛЛУРИДНЫХ ПЛЕНОК ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	189
В.П. ЛЕНКОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОТОКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИХРЕЙ ПО СКОРОСТЯМ В ВТСП ПРИ ПРОТЕКАНИИ ТРАНСПОРТНОГО ТОКА	190
Д.Э. ЛЕСНЫХ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГЕТЕРО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ WSe_2 В ЖИДКОСТИ.....	191
А.В. ЛИТВИНОВ, М.О. ЭТРЕКОВА, Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, И.Д. ПЕВЦОВ СОЧЕТАНИЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОГО И МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ГАЗА	192
А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ НАМАГНИЧЕННОСТЬ СЛОИСТОГО АНИЗОТРОПНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	193
И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, Д.А. АБИН, К.А. БОРОДАКО ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ В НЕИЗОЛИРОВАННЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОБМОТКАХ	194
П.И. НИКОЛЕНКО, И.В. ЩЕТИНИН СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА САЛЕГИРОВАННОГО ГЕКСАФЕРРИТА СТРОНЦИЯ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ	195
С.А. НУРЕТДИНОВ, В.В. ТАРКОВСКИЙ РАЗМЕРНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ NiCr И Cu-Ag СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО РАЗРЯДА.....	196
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, Б.Р. ГАЙНАНОВ, А.А. ИВАНОВ, С.Г. РУДАКОВ, А.А. ПИСАРЕВ, М.М. БЕРДНИКОВА, Е.С. КУЛИКОВА, Н.А. КОЛЫШКИН, Е.В. ХРАМОВ, Р.Д. СВЕТОГОРОВ, И.В. ЩЕТИНИН, С.М. НОВИКОВ, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ, Н.В. ОГНЕВСКАЯ, Н.А. ЦАРЕНКО, И.Г. РАЧЕНОК, О.Н. СЕРЕГИНА, О.Д. ХОРОЗОВА, И.М. МЕЛЬНИКОВА ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ, ЛОКАЛЬНУЮ И ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ГАФНАТОВ РЗЭ $LN_2HF_2O_7$	197
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, А.А. ИВАНОВ, С.Г. РУДАКОВ, А.А. ПИСАРЕВ, М.М. БЕРДНИКОВА, Е.С. КУЛИКОВА, И.В. ЩЕТИНИН, С.М. НОВИКОВ, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ, Н.В. ОГНЕВСКАЯ, Н.А. ЦАРЕНКО, И.Г. РАЧЕНОК, О.Н. СЕРЕГИНА, О.Д. ХОРОЗОВА, И.М. МЕЛЬНИКОВА ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И ЛОКАЛЬНУЮ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ МОЛИБДАТОВ И ВОЛЬФРАМАТОВ РЗЭ $LN_2(BO_4)_3$ (B = Mo, W).....	198
О.В. РУБИНКОВСКАЯ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ DFT-АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОФАЗ В КАТАЛИЗАТОРЕ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ MoS_x	199
К.Н. РЫКУН, А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, В.А. КАШУРНИКОВ ВЛИЯНИЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ БАЗИСА СЛОЖНЫХ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВТСП	200
Н.Р. САДЫКОВ, И.Е. ШАКИРОВ ГЕНЕРАЦИЯ МИКРОВОЛНОВОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОАКСИАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ В СРЕДЕ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНОВЫХ НАНОТРУБОК	201

Е.О. СЕРОВ, П.С. САВЧЕНКОВ, А.В. РОГАЧЕВ, В.И. БОДНАРЧУК НЕЙТРОННАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ НА РЕАКТОРЕ ИР-8.....	202
Н.Н. СИТНИКОВ, С.В. ГРЕШНЯКОВА, И.А. ЗАЛЕТОВА ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ В СЛОИСТЫХ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТАХ СПЛАВА $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ.....	203
В.Г. СРЕДИН, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, А.П. МЕЛЕХОВ, Р.Ш. РАМАКОТИ, А.А. СТЕПАНЕНКО, К.С. АНДРЕЙЧИКОВ ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ПОВЕРХНОСТНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК – АНТИМОНИД ИНДИЯ	204
И.С. СТЕПАНОВ, Л.И. БУДАЕВА, С.В. СТЕПАНОВ КОГДА ПРОИСХОДИТ ПОГЛОЩЕНИЕ СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ЛЬДА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОЗИТРОННОЙ АНИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ?	205
С.В. СТЕПАНОВ, Л.Ю. ДУБОВ, О.В. ИЛЮХИНА, Ю.В. ШТОЦКИЙ, Ю.А. АКМАЛОВА, Л.И. БУДАЕВА ПОЗИТРОННАЯ ДИАГНОСТИКА FE-GA СПЛАВОВ	206
К.А. СУРНИНА, А.А. МИХАЙЛОВ, Д.А. АБИН, А.Ю. МАЛЯВИНА, К.А. БОРОДАКО РАЗРАБОТКА КОАКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА МИКРОПИНЦЕТА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ	207
Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, А.Н. УРАКОВ, В.Х. ХАЛМУХАМЕДОВА, С.Т. ГУЛЯМОВА ИЗУЧЕНИЕ ЭМИССИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК MgO ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ АКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ	208
М.П. ТЕЛЕНКОВ, Ю.А. МИЯГИН ТЕОРИЯ НЕРАВНОВЕСНОГО РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ИЗ КВАНТОВЫХ ЯМ В КВАНТУЮЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	209
М.А. ТОМАЕВА, В.Д. НЕВЕРОВ, А.В. КРАСАВИН, А.В. КАЛАШНИКОВ, А.В. ВАГОВ М.Д. КРОИТОРУ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЙ.....	210
У.Б. УЛЖАЕВ, А.Н. УЛУКМУРАДОВ, У.Б. ХАЛИЛОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ УДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИ АДСОРБИРОВАННОГО ВОДОРОДА В ЭНДОЭДРАЛЬНОМ ОУНТ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ.....	211
Б.Е. УМИРЗАКОВ, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, А.А. АБДУВАИТОВ, Ж.Б. ХУЖАНИЯЗОВ, Б.В. ИБРАГИМОВА, А.У. ХУЖАНИЯЗОВА СОЗДАНИЕ СКРЫТЫХ СЛОЕВ В CdTe В ПРОЦЕССЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТЖИГА	212
Б.Е. УМИРЗАКОВ, З.А. ИСАХАНОВ, И.О. КОСИМОВ, М.М. МАХМУДОВ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ТОНКОГО ПОКРЫТИЯ $TiO_2/Si(111)$	213
И.И. УСМАНОВ, С.Н. НИКОЛАЕВ, Е.А. ЕКИМОВ, М.В. ШЕСТАКОВ, Д.А. ЗАЗЫМКИНА, В.С. КРИВОБОК ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ $Tm^{3+}B_2SnS_2$, СИНТЕЗИРОВАННОМ ПРИ ВЫСOKИХ ДАВЛЕНИИ И ТЕМПЕРАТУРЕ	214
И.Е. УТКИН, И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА $YBa_2Cu_3O_7$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ	215
А.В. ФРАНЦКЕВИЧ, В.А. МАРТИНОВИЧ, Н.В. ФРАНЦКЕВИЧ МОДИФИКАЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО Cz-Si В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ В DC ПЛАЗМЕ ВОДОРОДА.....	216
А.А. ХАЛЯВИНА, С.В. РОГОЖКИН, А.В. КЛАУЗ, А.А. БОГАЧЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ	217
А.В. ЦУКАНОВ УСЛОВНАЯ ДВУХКУБИТНАЯ ОПЕРАЦИЯ СПОТ НА ТРОЙНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ В ОПТИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ	218
А.В. ЦУКАНОВ, И.Ю. КАТЕЕВ ДЕФАЗИРОВКА ЗАРЯДОВОГО КУБИТА, ВЫЗВАННАЯ СТРУКТУРНЫМИ ДЕФЕКТАМИ И СТОРОННИМИ ЗАРЯДАМИ	219

А.Д. ЧЕРТОВА, К. ГОНЧАРЕНКО, Е.В. ЧЕРНЫШОВА, А.Ю. ПОТАНИН, П.А. ЛОГИНОВ, Е.А. ЛЕВАШОВ, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЁНКАХ Ti-B-C, Zr-B-C и Zr-Ti-B-C	220
.....	
М.С. ШЕСТОПАЛОВА, А.К. САРЫЧЕВ, А.В. ИВАНОВ, И.В. БЫКОВ, В.А. ОЛЕЙНИКОВ, К.Е. МОЧАЛОВ ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА УСИЛЕНИЕ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОСФЕР В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ.....	221
Секция УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	222
М.В. ЛАЛАЯН, А.Г. ПОНОМАРЕНКО К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА, ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК ОЛЕГА СЕРГЕЕВИЧ МИЛОВАНОВА.....	223
Ю. СЕНИЧЕВ, А. АКСЕНТЬЕВ, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, В. ЛАДЫГИН, А. МЕЛЬНИКОВ, Н. НИКОЛАЕВ, Е. СЫРЕСИН, Ю. ФИЛАТОВ МОДЕРНИЗАЦИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НУКЛЮТРОНА ДЛЯ ПОИСКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ДЕЙТРОНА И ПРОТОНА С СОХРАНЕНИЕМ ВСЕХ ФУНКЦИЙ БУСТЕРНОГО КОЛЬЦА NICA.....	224
А.П. ДУРКИН, В.В. ПАРАМОНОВ МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩЕГО КАНАЛА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ НА НИЗКИЕ ЭНЕРГИИ	225
А.Е. АКСЕНТЬЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МЕТОДА ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЕМ К СТРУКТУРЕ С КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННЫМ СПИНОМ.....	226
А.А. МЕЛЬНИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТИПА КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО СПИНА ДЛЯ ПОИСКА ЭДМ	227
М.В. ВЛАДИМИРОВ В ПОИСКАХ САМОСОГЛАСОВАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОКАТОДОВ В ФОТОПУШКАХ	228
С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЯРКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ В ФОТОПУШКАХ	229
И.В. РЫБАКОВ, В.В. ПАРАМОНОВ ОБЪЕДИНЕНИЕ СЕКЦИЙ СТРУКТУРЫ SDTL В РЕЗОНАНСНУЮ СИСТЕМУ	230
Н.Ю. САМАРОКОВ, М.В. ЛАЛАЯН, С.М. ПОЛОЗОВ РАСЧЕТ И НАСТРОЙКА СИЛЬНОТОЧНОГО ФОТОЭМИССИОННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ.....	231
Р.А. ЗБРУЕВ, А.А. БАТОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, М.В. ЛАЛАЯН, М.В. ВЛАДИМИРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВЧ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЭНЕРГИЮ 8 МЭВ.....	232
С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ ДУАЛЬНАЯ МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ ЛЁГКИХ И ТЯЖЁЛЫХ ЧАСТИЦ.....	233
А.Н. ЮНАКОВ, Д.А. КОМАРОВ СВЕРХМОЩНЫЕ КЛИСТРОНЫ ДЛЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ.....	234
Р.А. ОСИН, Д.А. КАЛАШНИКОВ, Д.А. КОМАРОВ, Д.С. ТРОФИМОВ КАЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТУРА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В МОЩНОМ КЛИСТРОННОМ УСИЛИТЕЛЕ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ.....	235
Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.А. МОРОЗОВА, А.Е. ШИКАНОВ ДИАГНОСТИКА БЫСТРЫХ ИОНОВ НАНОСЕКУНДНОГО ПИНЧА С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИРОВАНИЕМ.....	236
И.И. ПОЛОНICK, С.А. ГАВРИЛОВ РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ДЛЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ	237
В.Е. АМОСОВА, С.А. ГАВРИЛОВ РАЗРАБОТКА ПОЛОСКОВОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА	238

И.Д. САДОФЬЕВ, М.П. ПАНИН МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ДО 6 ГЭВ ЧЕРЕЗ ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА СИНХРОТРОНА	239
Р.А. ЗБРУЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ.....	240
А.В. ЗИЯТДИНОВА ВАРИАНТ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУЧКА ПРОТОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО УСКОРИТЕЛЯ	241
В.С. ДЮБКОВ АКТУАЛИЗИРОВАННЫЙ КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ И ИОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ	242
В.С. ДЮБКОВ, И.А. ЮРИН РАСЧЕТ ИМПЕДАНСОВ ВАКУУМНЫХ КАМЕР НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА СИЛА.....	243
Г.О. БУЯНОВ, А.Р. КАРИМОВ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛН В ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ И ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМАХ	244
Г.О. БУЯНОВ, А.Р. КАРИМОВ УРАВНЕНИЕ ЕРМАКОВА-ПИННИ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИЕ ВОЛНЫ В ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ	245
В.Е. ЗАМЫШЛЯЕВА, Н.В. МАРКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ ПОЛУЧЕНИЕ МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ПРОТОНОВ ПРОЕКТА DARIA.....	246
П.А. Федин, К.Е. Прянишников, А.В. Козлов, Т.В. Кулевои ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР	247
Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА, В.И. НИКОЛАЕВ, Г.Н. КРОПАЧЁВ, Т.В. КУЛЕВОЙ КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ПРОТОНОВ ОТ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДО СИНХРОТРОНА ПРОЕКТА «ЛУЧ-ПРОТОН».....	248
Н.Ф. ДРЕБЕЗОВА, А.В. ПРОКОПЕНКО, И.В. ЛУШНИКОВ МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА СВЯЗИ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МАЛОГАБАРИТНОГО МАГНЕТРОНА.....	249
С.В. МАЦИЕВСКИЙ, М.В. ЛАЛАЯН, М.А. ГУСАРОВА, И.Р. КАЛИЕВА ПРОГРАММА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ.....	250
Я.М АБАКУМОВ РАСЧЕТ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ БАНЧЕРОВ Б1-Б3	251
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ СВЧ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ С ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ.....	252
С.В.КОБЕЛЕВА РАСЧЕТ ОХЛАЖДАЮЩИХ КАНАЛОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА	253
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ЗАДАЮЩЕГО ГЕНЕРАТОРА КЛИСТРОНА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,8 ГГц	254
Е.А. КУНИН, С.В. СЕРУШКИН ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПУШКА ДЛЯ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ УСТАНОВОК	255
Л.Ю. ОВЧИННИКОВА, В.В. ПАРАМОНОВ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНЫХ КВАДРУПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ.....	256
Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, К.Е. Прянишников, Т.В. Кулевои ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОКА ЛАБОРАТОРНОГО ИСТОЧНИКА ЛЕГКИХ ИОНОВ С РЕЗОНАНСНОЙ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРОЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЕ.....	257
А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ.....	258
С.М. ПОЛОЗОВ, М.А. СОЛОМАТИН, В.Л. ШАТОХИН АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРИИ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ	259

А.А. ИСАЕВ, Р.П. ПЛЕШАКОВА, А.Е. ШИКАНОВ ГАЗОНАПОНЕННЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ТРУБКИ (ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ).....	260
Д.Л. ЛОГВИНОВ, Д.А.ЛЯКИН, Е.Д. ЦЫПЛАКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОЕКТА «ЛУЧ-ПРОТОН».....	261
Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, Т.А. ЛОЗЕЕВА, Г.Б. ШАРКОВ, А.А. МОРОЗОВ РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ НА БАЗЕ НИЯУ «МИФИ» СУММАТОРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ	262
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, О.А. ИВАНОВ РАЗРАБОТКА ДЛИННОФОКУСНОЙ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ И ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ЭЦР ИСТОЧНИКА	263
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, А.С. КРАСНОВ РАЗРАБОТКА ЦИЛИНДРОВ ФАРАДЕЯ ИЗ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА ЭНЕРГИЮ 7МэВ И 5кэВ	264
А.А. МАЛЫШЕВ, Е.Д. ЦЫПЛАКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Н.В. МАРКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ МЕДИЦИНСКОГО УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ЛУЧ-ПРОТОН»	265
Секция ДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ	266
А.И. САВВАТИМСКИЙ, С.В.ОНУФРИЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СВЕРХ-ТУГОПЛАВКОЙ КЕРАМИКИ $HFC_{0.51}N_{0.32}$ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 2000-5500 К	267
А.И. САВВАТИМСКИЙ, С.В.ОНУФРИЕВ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХ-ТУГОПЛАВКОЙ КЕРАМИКИ ZRB_2 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 2000-5000 К (ЭКСПЕРИМЕНТ).....	268
В.А. ПУШКОВ, Ю.В. БАТЬКОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЦЕРИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.....	269
А.В. ФЕДОТОВА, Ю.В. БАТЬКОВ, И.А. ТЕРЕШКИНА, И.Р. ТРУНИН СЖАТИЕ И ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛИ 3 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛАБОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ	270
Е.А. БИЛЛЕ, С.А. ГУБИН И.В. МАКЛАШОВА ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	271
Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.С. БЕТЕВ, А.М. ТЕРЕЗА С.В. ХОМИК, С.П. МЕДВЕДЕВ О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СТРУКТУРЫ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ В ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ	272
А.Э. КОЗАЧЕНКО, Г.Л. АГАФОНОВ, А. С. БЕТЕВ, А.М. ТЕРЕЗА, С.П. МЕДВЕДЕВ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИРОЛИЗА И САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРОПЕНА В УДАРНЫХ ВОЛНАХ	273
М.А. ПАРАМОНОВ, Д.В. МИНАКОВ, П.Р. ЛЕВАШОВ ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВИНЦА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	274
А.С. СМАЛЬ, Ю.А. БОГДАНОВА, А.А. СУРАЕВА, А.А. ЕГОРОВ МЕТОДЫ КВАНТОВОГО МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГИИ АДСОРБЦИИ ВОДОРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ НИКЕЛЯ	275
В.П. ЕФРЕМОВ, А.В. УТКИН, Л.Р. ОБРУЧКОВА ГЕНЕРАЦИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕТОВОДОВ	276
К.В. ХИЩЕНКО МОДЕЛИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССАХ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ	277
Н.Н. СЕРЕДКИН, К.В. ХИЩЕНКО УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СМЕСИ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ И ПЕРИКЛАЗА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ	278
К.А. БОЯРСКИХ, К.В. ХИЩЕНКО УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ТАНТАЛА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ.....	279

С.М. ФРОЛОВ, В.С. ИВАНОВ, В.С. АКСЕНОВ, И.О. ШАМШИН АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ РАСПЫЛЕНИЕ СТРУЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ИМПУЛЬСНЫМИ УДАРНЫМИ И ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ.....	280
И.А. САДЫКОВ, А.С. СИЛАНТЬЕВ, В.А. СМЕТАНЮК, С.М. ФРОЛОВ ТЕРМОМЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА.....	281
А.Р. АХУНЬЯНОВ, П.А. ВЛАСОВ В.Н. СМИРНОВ, В.С АРУТЮНОВ, Ю.А. КРОВЯКОВА ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК Н ₂ И СО НА ПРОЦЕСС САЖЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПИРОЛИЗЕ И ОКИСЛЕНИИ ЭТИЛЕНА В ОТРАЖЕННЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ.....	282
П.О. ВИНОГРАДОВ, Ю.А. БОГДАНОВА РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТР-ЗАДАЧИ И РАСЧЕТА РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА.....	283
Т.К. КИРГИЗОВ, Ю.А. БОГДАНОВА, И.В. МАКЛАШОВА ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАЛОРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ	284
Ф.С. СЕТАБЛАЕВ, И.В. МАКЛАШОВА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ БОРА	285
Т.В. ФЕДОСЕЕВ, Т.В. БОГДАН, С.Э. БОГОРОДСКИЙ, В.И.БОГДАН ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕХОДА СМЕСИ ВОДЫ И ЭТАНОЛА В СВЕРХКРИТИЧЕСКУЮ ОБЛАСТЬ: СОГЛАСИЕ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТА	286
Н.В. АПАЛЬКОВ, И.В. МАКЛАШОВА РАСЧЁТ УДАРНОГО СЖАТИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	287
Секция Электрофизическое и ядерное приборостроение	288
А.И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, Е.В. РЯБЕВА, А.П. ДЕНИСЕНКО, В.А. КУГАВДА ДОЗИМЕТР НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА С РЕГИСТРАЦИЕЙ СВЕТА ПОСРЕДСТВОМ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ.....	289
С.В. ГАВРИШ, А.О. ПОТАПЕНКО, П.А. ЧИЛИКИНА, С.Г. ШАШКОВСКИЙ РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ	290
А.В. ЗИНОВЬЕВ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕТОД АНАЛИЗА ОТКАЗОВ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ	291
Р.Ф. ИБРАГИМОВ, А.П. ДЕНИСЕНКО, М.Ю. МИШИН, Е.В. РЯБЕВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ПРИБОРА ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ АКТИВАЦИОННЫМ МЕТОДОМ	292
А.Ф. КОВАЛЕНКО ПРОБИТИЕ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ	293
В.А. КУГАВДА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА, А.П. ДЕНИСЕНКО МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА ЕJ-276 БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ	294
И.М. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ МАЛОГАБАРИТНЫЕ ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПЕННИНГА С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	295
А.В. МАМОНТОВ, А.Н. ЮНАКОВ, Е.Д. КРАЙНОВ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ НОВОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТОМОГРАФА С ДВОЙНЫМ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ	296
Г.В. МАРИЧЕВ, В.А. СТЕПАНОВ ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРОНОВ.....	297
Ю.В. МИХАЙЛОВ. И.А. ПРОКУРАТОВ. Б.Д. ЛЕМЕШКО, А.К. ДУЛАТОВ РЕСУРС РАБОТЫ ОТПАЯННЫХ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА КАК ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	298

А.О. МОРОЗОВ, С.А. ВОРОНИН, А.В. ПРОКОПЕНКО, М.Ю. СВАЛЕЕВ РЕКОНСТРУКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК ДЛЯ КТ АППАРАТОВ.....	299
Д.Ю. НИЗАМОВ, С.А. ЗАЙЦЕВ, А.В. ЛАЗУКИН ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСА ТОКА МИКРОРАЗРЯДА ДЛЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	300
В.В. ФЕДОРЕНКО, С.Б. ЧЕБЫШОВ, В.С. ЯШИН НОВЫЙ ПОДХОД В ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА.....	301
Д.К. ЧЕРЧЕНКО, Д.А. КОМАРОВ К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ДЛЯ ЭВП СВЧ О-ТИПА	302
С.Н. ШАЦКИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И ФОРМОВОЧНЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ КОМПАУНДЫ НА ОСНОВЕ НИЗКОВЯЗКИХ ЭФИРЭПОКСИДОВ.....	303
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ	304
А.А. ШЕЛКОВОЙ, С.А. УРЮПИН ТОРМОЖЕНИЕ ПУЧКА БЫСТРЫХ ИОНОВ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ В ПЛАЗМЕ С РАЗВИТОЙ ИОННО-ЗВУКОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ	305
Д.А. ГОЖЕВ, О.Е. ВАЙС, С.Г. БОЧКАРЕВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНО-НАГРЕТЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ КЛАСТЕРНОЙ И МИКРОКАПЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ	306
А.И. БАРАНОВА, А.А. ТИЩЕНКО О КИНЕМАТИКЕ СВЕРХСВЕТОВОГО ИСТОЧНИКА В ВАКУУМЕ	307
О.Е. ВАЙС, М.Г. ЛОБОК, В.Ю. БЫЧЕНКОВ ГЕНЕРАЦИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО САМОЗАХВАТА МУЛЬТИТЕРАВАТТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА.....	308
Ф.О. КИСЕЛЁВ, Д.Ю. СЕРГЕЕВА СПИРАЛЬНАЯ ПЛАСТИНКА КАК ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	309
Д.Д. БАРАНОВ, А.В. ХУДОВ, С.В. ПОПРУЖЕНКО РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ В ФОКУСИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ	310
Н.Д. БУХАРСКИЙ, Ф.А. КОРНЕЕВ О ВОЗМОЖНОСТИ КОЛЛИМАЦИИ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ ТИПА «УЛИТКА»	311
М.П. МАЛАХОВ, А.М. ФЕДОТОВ, С.Г. РЫКОВАНОВ НЕЛИНЕЙНОЕ ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНА НА ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСЕ С ДВИЖУЩИМСЯ ФОКУСОМ.....	312
Д.И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА ДВОЙНУЮ ИОНИЗАЦИЮ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ИНТЕНСИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ....	313
Н. В. МАКАРЕНКО, С. В. ПОПРУЖЕНКО ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ТУННЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ	314
А.И. АЛЕКСЕЕНКО, А.В. БЕРЕЗИН, А.М. ФЕДОТОВ ВЛИЯНИЕ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАСПАД ЗАРЯЖЕННОЙ СКАЛЯРНОЙ ЧАСТИЦЫ	315
Е. О. ДМИТРИЕВ, Ф. А. КОРНЕЕВ О ПЕРЕДАЧЕ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ АНСАМБЛЮ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.....	316
Е. Г. ГЕЛЬФЕР, Е. Е. ПЕГАНОВ, С. В. ПОПРУЖЕНКО ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ В ПЛАЗМЕ, ИНДУЦИРОВАННЫЙ ГЕОМЕТРИЕЙ МИШЕНИ	317
М. К. СТЕПАНОВ, Н. Д. БУХАРСКИЙ, Ф. А. КОРНЕЕВ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СТРУК- ТУРИРОВАННЫХ МИШЕНЯХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОТОНОННОЙ ДЕФЛЕКТОМЕТРИИ	318

Ю. В. СЕЛИВАНОВ, А. М. ФЕДОТОВ АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ФИНАЛЬНОГО ЧИСЛА ЛЕПТОНОВ В ЭЛЕКТРОМАГИТНОМ КАСКАДЕ В ПОСТОЯННОМ СКРЕЩЕННОМ ПОЛЕ	319
Ю.К. ГАГАРИН, Ф.А. КОРНЕЕВ ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МЕХАНИЗМ АВТОРЕЗОНАНСНОГО ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА.....	320
М.И. ГОЗМАН ЛИНЕЙНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АЛГЕБРЫ ЛИ ГРУППЫ ДИФФЕОМОРФИЗМОВ В ЧЕТЫРЁХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	321
Д. О. КОНДАУРОВ, Е. А. ПОЛЯКОВ ДИССИПАТИВНАЯ ДИНАМИКА ОТКРЫТЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ В СЛУЧАЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ	322
Е.В. СКИРДОВА, Н.С. ВОРОНОВА ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ХОНГА-ОУ-МАНДЕЛА ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧАСТИЦ.....	323
Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ, В.В. МАРИНЮК, Д.Б. РОГОЗКИН СИЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА В УСЛОВИЯХ СОХРАНЕНИЯ ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ.....	324
А. ГРУДИНИНА, М. ПОСАЖЕНКОВ, Н. ВОРОНОВА ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ ТУННЕЛИРОВАНИЯ НА ДЕФЕКТЕ ДЛЯ БОЗЕ-КОНДЕНСАТОВ В ГЕОМЕТРИИ РАЗОРВАННОГО КОЛЬЦА.....	325
С.С. ОНУЧИН, Я.С. ЛЯХОВА УЧЁТ КВАНТОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРА ПОРЯДКА В СИСТЕМАХ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФЕРМИОНОВ	326
Е.Р. СЛЕПЦОВА, И.Л. КУРБАКОВ, Н.С. ВОРОНОВА БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИЯ В МАЛЫХ ЭКСИТОННЫХ КЛАСТЕРАХ.....	327
В.И. БОНДАРЕНКО, М.Г.УРИН О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАМОВ-ТЕЛЛЕРОВСКОЙ СИЛЫ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ МАГИЧЕСКИХ МАТЕРИНСКИХ ЯДРАХ	328
И.Н. БОРЗОВ ЗАРЯДОВЫЕ РАДИУСЫ И β -РАСПАД ИЗОТОПОВ В БЛИЗИ МАГИЧЕСКОЙ НЕЙТРОННОЙ ОБОЛОЧКИ N=126.....	329
Ф.Ф. КАРПЕШИН ВОЗБУЖДЕНИЕ ГИГАНТСКИХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В МЮОННЫХ АТОМАХ АКТИНИДОВ	330
М.Л. ГОРЕЛИК, М.Г. УРИН СВОЙСТВА ИЗОСКАЛЯРНЫХ ГИГАНТСКИХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕ-ТЯЖЁЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.....	331
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ	332
А. С. БОИМ, В.И. ВАСИЛЬЕВ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АМОРТИЗАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ МОБИЛЬНОГО ВОДОРОДНОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ	333
Д.В. БОРТКО, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ, В.А. ШИЛОВ ПРОПУСКАНИЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ ТОНКИМИ НАНОКЛАСТЕРНЫМИ ПЛЁНКАМИ ИЗ НАНОЧАСТИЦ ТАНТАЛА.....	334
М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, С.А. ЗИБРОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ ДВУХЧАСТОТНАЯ СВЧ-МОДУЛЯЦИЯ ТОКА НАКАЧКИ ДИОДНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ	335
А.Э. КАДЫРОВ, Д.С. КУПАЛОВ, Е.И. ИВАНЧЕНКО МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЦЕЗИЕВОГО РЕПЕРА ЧАСТОТЫ ФОНТАННОГО ТИПА	336
А.Е. КОРОЛЬКОВ, А.С. БОРИСЕНКО, И.В. ЗАЛИВАКО, И.А. СЕМЕРИКОВ, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ, К.Ю. ХАБАРОВА ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКУБИТНЫХ GHZ СОСТОЯНИЙ НА ЦЕПОЧКЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ ИОНОВ ДЛЯ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ	337
А.В. КОХАНОВ, А.Э. КАДЫРОВ, М.Г. ГУРОВ ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО ЭКРАНА НА СДВИГ ЧАСТОТЫ В ОПТИЧЕСКОМ СТАНДАРТЕ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ СТРОНЦИЯ-87	338
О. Р. ПУТИН, С.А. КОЗЛОВ, Д.С. КОЛУПАЕВ, В.П. СЫСОЕВ, Н.М. ВАСИЛЬЕВ РАСЧЁТ ДОБРОТНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ.	339

К.М. САБАКАРЬ, А.С. ФЁДОРОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, С.А. ЗИБРОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ ДВУХЧАСТОТНАЯ ВНУТРИДОПЛЕРОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ D ₁ -ЛИНИИ АТОМОВ ⁸⁷ Rb.....	341
К.М. САБАКАРЬ А.С. ФЁДОРОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, С.А. ЗИБРОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРИДОПЛЕРОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ, СОЗДАННЫХ ДВУХЧАСТОТНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ В ИЗОТОПАХ ⁸⁵ Rb И ⁸⁷ Rb	342
К.К. ТРИЧЕВ, П.В. БОРИСЮК, П.А. ЧЕРЕПАНОВ, Д.О. ТРЕГУБОВ, Г. КИНТАНА АКОСТА ИЗМЕРЕНИЕ ИЗОТОПИЧЕСКИХ СДВИГОВ В МОНОИЗОТОПНЫХ ОБЛАКАХ ИОНОВ СТРОНЦИЯ	343
Е. А. ЦЫГАНКОВ, М. И. ВАСЬКОВСКАЯ, Д. С. ЧУЧЕЛОВ, К. М. САБАКАРЬ, С. А. ЗИБРОВ, В. В. ВАСИЛЬЕВ, В. Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ ВЫСОКОКОНТРАСТНЫЙ ОБРАЩЁННЫЙ ВНУТРИДОПЛЕРОВСКИЙ РЕЗОНАНС НА М-ТИПЕ АТОМНОГО ПЕРЕХОДА	344
Д.С. ЧУЧЕЛОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, К.М. САБАКАРЬ, С.А. ЗИБРОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ РЭМСИ-КПН РЕЗОНАНСЫ В ТУШАЩИХ И ДЕПОЛЯРИЗУЮЩИХ ГАЗАХ.....	345
В.А. ШИЛОВ, Д.В. БОРТКО, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ НАНОКЛАСТЕРОВ ОКСИДА ТАНТАЛА (V) И CORE-SHELL НАНОКЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА/ОКСИДОВ ТАНТАЛА ОТ РАЗМЕРА.....	346
Н.Ю. ШЛЫКОВ, М.О. ЯУШЕВ, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А. МИШИН, Д.О. ТРЕГУБОВ, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ, А.А. ГОЛОВИЗИН СПЕКТРОСКОПИЯ РИДБЕРГОВСКИХ СОСТОЯНИЙ АТОМА ТУЛИЯ.....	347
Секция ОБРАЗОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ: ВЫЗОВЫ, МЕТОДИКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ	348
О.Н. ГУСТУН, В.Д. КОСТЫЛЕВ, Ю.К. ЛАВДИНА СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ СТУДЕНТОВ ОСНОВНОГО И УГЛУБЛЕННОГО УРОВНЕЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИНФОРМАТИКА»	349
Е.В. АЛЕШИНСКАЯ, Л.В. РАССКАЗОВА ВОЗМОЖНОСТИ ЖАНРОВОЙ ПЕДАГОГИКИ В ОБУЧЕНИИ АСПИРАНТОВ ИНЖЕНЕРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АКАДЕМИЧЕСКОМУ ПИСЬМУ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ	350
И.В. БАРАНОВ ПРИМЕНЕНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И РАЗВИТИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН	351
Н.А.БОГДАНОВА, Ю.И.БОГДАНОВ ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВУЮ ИНФОРМАТИКУ ЧЕРЕЗ БАЗОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	352
А.Д. ЕГОРОВ, А.М. ХАСАНОВА ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ КУРСА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ	353
Н.С. ИЛЬИН, А.С. КОВАЛЬ АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИИ ЗАДАНИЙ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКЕ СРЕДСТВАМИ T-FLEX CAD	354
М.А. КАЛИНИЧЕВ, Я.С. ЛЯХОВА ОБЗОР ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПО КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ ДЛЯ АБИТУРИЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ	355
С.В. КИРЕЕВ, В.М. КАЛАШНИК РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ДПО НИЯУ МИФИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КВАЛИФИЦИРОВАННЫМИ И ВОСТРЕБОВАННЫМИ КАДРАМИ ПРИОРИТЕТНЫХ ОТРАСЛЕЙ РОССИИ	356
Б.Г. КИСЕЛЁВ КУРС “ВВЕДЕНИЕ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ” В ИНЖЕНЕРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ	357
В.М. КОРОБОВ, Б.Е. ЛЕВКОВИЧ, Г.П. ТЕРЕХОВ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБУЧЕНИИ САПР T-FLEX СТУДЕНТОВ НИЯУ МИФИ	358

А.В. КОШЕЛКИН, О.В. ЩЕРБАЧЕВ НЕПРЕРЫВНОЕ ИНКЛЮЗИВНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ	359
Е.В. КУЗЬМИНА МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВОВЛЕКАЮЩЕГО ОБУЧЕНИЯ CRAFTED	360
Н.В. БУДАРАГИН, О.Н. ГУСТУН, Ю.К. ЛАВДИНА, Э.И. МАСЯГУТОВ БАЛЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ.....	361
А.Д. МОДЯЕВ, Н.М. ЛЕОНОВА, О.Н. ГУСТУН УРОВНЕВАЯ ИНФОРМАТИКА В НИЯУ МИФИ	362
А.Н. МАКСИМОВА, А.Ю. МАТРОНЧИК, С.С. МУРАВЬЕВ-СМИРНОВ, Н.А. КЛЯЧИН, Д.А. САМАРЧЕНКО, Е.М. СЕРЕБРЯКОВА, В.А. ШИЛОВ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «КВАНТОВЫЙ ЛАСТИК»: РЕАЛИЗАЦИЯ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ НИЯУ МИФИ	363
Т.В. НИКИТИНА ФАКТОРЫ ВОВЛЕЧЕННОСТИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ПО ФИЗИКЕ В ВУЗЕ.....	364
А.Л. ВДОВКИН, С.А. КОРОБОВ, М.И. КОНЬКОВА ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ИНТУИТИВНОГО И ФОРМАЛЬНОГО АСПЕКТОВ В ОБУЧЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ.....	365
Н.А.ПЕВНЕВА, О.В.ЛИННИК, А.И.ПОПОВА ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ЗАТО НА ПРИМЕРЕ СФТИ НИЯУ МИФИ.....	366
А.М. КОЛМОГОРЦЕВ, Н.А. ПЕВНЕВА, О.В. ЛИННИК ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ МАГИСТРАТУРА В ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ: ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ.....	367
В.И. ПЕТРОВ, А.М. ВИЛЯНСКИЙ ЭЛЕКТИВ ДЛЯ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ.....	368
А.П. ПЛЁНКИН, В.В. ЮШИЦЫНА, И.А. СУРМЕНЕВА, А.В. ЗЫКОВА ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	369
В.Ю. САВИН, П.Н. РЯБОВ ОБ ОПЫТЕ ОРГАНИЗАЦИИ СТУДЕНЧЕСКОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИГИ НИЯУ МИФИ.....	370
Т.О. САНЧАА ПРЕДВУЗОВСКАЯ ПОДГОТОВКА БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ НА УРОВНЕ СРЕДНЕГО ОБЩЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	371
И.В. АРХАНГЕЛЬСКАЯ, А.В. ВИНОГРАДСКАЯ, И.Д. ЗАРИПОВ, А.И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, Е.А. РУДАКОВА, А.И. МАДЖИДОВ, Е.Н. ЧАСОВИКОВ, М.О. ПАНЬКОВА, В.В. МИНАСЯН, Е.И. ПЛОТНИКОВА ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ В НИЯУ МИФИ	372
А.В. ПАРУСНИКОВА МАТЕМАТИЧЕСКИЕ БОИ МИЭМ.....	373
Е.О. САВЕЛЬЕВА, И.Л. САВЕЛЬЕВ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ИНЖЕНЕРНЫХ VR И AR ПРОЕКТОВ СТУДЕНЧЕСКИМИ КОМАНДАМИ.....	374
В.В. ВАЙТОНИС, Я.С. ЛЯХОВА ОБЗОР ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЕКТА «ЛАПЛАЗИАН»	375
Л.Д. АЛАЕВА, А.Д. БАКУН РОЛЬ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКТОРОВ В STEM-ОБРАЗОВАНИИ И ОБУЧЕНИИ ФИЗИКЕ В ШКОЛАХ.....	376
К.В. КАН, П.Н. РЯБОВ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТНОГО ПОДХОДА В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ БАКАЛАВРИАТА НАПРАВЛЕНИЯ 01.03.02	377
Ю.В. МАСЛОВА, С.Н. ТОРГАЕВ, Д.Е. КАШИРСКИЙ ОБРАЗОВАНИЕ В ОБЛАСТИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ: ВЫЗОВЫ, ОПЫТ, ПЕРСПЕКТИВЫ.....	378
П.Н. РЯБОВ, А.П.КУЗНЕЦОВ МОДЕЛЬ STEM-ОБРАЗОВАНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ ПРОГРАММАХ ВУЗОВ	379
С.В. ГЕНИСАРЕТСКАЯ, А.А. СОЛОВЬЕВ УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК: ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ.....	380
Секция Физика кинетических явлений и масс-спектрометрия	381

С.С. ПОТЕШИН, Д.Д. ОДИНЦОВ ТРАНСПОРТ ИОНОВ В УЗКИХ ГАЗОНАПЛНЕНЫХ КАНАЛАХ	382
Д.Д. ОДИНЦОВ, С.С. ПОТЕШИН СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АБЕРРАЦИОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ С МОДЕЛИРОВАНИЕМ В SIMION	383
М.Н.КРАЙНОВ, А.Ю.АДАМОВ, А.А.СЫСОЕВ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА НОВОГО ТАНДЕМНОГО ТРЕХКВАДРУПОЛЬНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА С ДЕТЕКТОРОМ ИОНОВ ВЭУ-6М-1	384
М.М. ШИШИРИН, А.Ю. СМИРНОВ ОПТИМИЗАЦИЯ КВАЗИДЕАЛЬНОГО КАСКАДА С РАЗЛИЧНЫМИ СРЕЗАМИ ПАРЦИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В СЕКЦИЯХ	385
С.В. БОГОВАЛОВ, Д.Н. ДЖУЛЯ, И.В. ТРОНИН РАЗДЕЛИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРЯМОТОЧНОЙ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ С ОДНОРОДНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПОТОКА МАССЫ ИЗОТОПНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ.....	386
С.В. БОГОВАЛОВ, А.В. ВАСИЛЬЕВ, И.В. ТРОНИН, Д.С. ЩУРОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ БЕСКАСКАДНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ИЗОТОПНЫХ СМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГИПЕРСКОРОСТНЫХ ЦЕНТРИФУГ	387
А.А. БЕЛОГОРЛОВ, Ю.Е. ГОРШКОВА, Г.П. КОПИЦА, А.И. КУКЛИН, Д.В. ЛЬВОВ, П.Г. МИНГАЛЕВ, А.Н. ТЮЛЮСОВ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАПОЛНЕНИЯ НАНОПОРИСТЫХ СИСТЕМ НЕСМАЧИВАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ	388
Ф.С. ДЖЕПАРОВ, Д.В. ЛЬВОВ, А.Н. ТЮЛЮСОВ, Й. ШМАЙСНЕР РАСЧЕТ ПАРНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЙ ОБРАЗЦА	389
Ф.С. ДЖЕПАРОВ, Д.В. ЛЬВОВ ТЕОРИЯ МНОГОКРАТНОГО МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ОБРАЗЦАХ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ЯДРАМИ.....	390
А.С. ГИЗЗАТОВ, Ю.С. ЕРЕМИН, М.А. ПЕТРОВ, А.М. ГРЕХОВ ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ГРАФЕНА НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ИЗ ПОЛИСУЛЬФОНА ...	391
Э.Р. ХАЗЕЕВА, Ю.С. ЕРЕМИН, А.М. ГРЕХОВ, С.В. ФАДЕЕВ, А.А. ПЛЕХАНОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЛЕНОК ИЗ ПОЛИСУЛЬФОНА С ВНЕДРЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ И ГРАФЕНОМ.....	392
М.А. ПЕТРОВ, Ю.С. ЕРЕМИН, А.М. ГРЕХОВ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С ВНЕДРЕННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА ГРАФЕНА	393
Семинар Физика экстремального состояния вещества на лазерном комплексе ЭЛЬФ	394
КУЗНЕЦОВ А.П., ДЕРКАЧ В.Н., ГАРАНИН С.Г., ЛОБАНОВ А.В. КРАВЧЕНКО В.В., МИХАЙЛЮК А.В., МЕЛЕХОВ А.П. , КАДЫРОВ А.Э. , ЦАРЁВ М.С., ДЕШИН Д.А. , ДУДАЛИН М.С. , ВОЛКОВ К.И., КАЗАРЦЕВ Г.А. , РАДЫГИН Д.Е., АБАКУМОВ Ю.М., КУЛИКОВ М.А. , ДЕГТЯРЕВ М.В., РЫНДЫК Е.Р. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ЭЛЬФ» СТАТУС ПРОЕКТА....	395
КАДЫРОВ А.Э., КУЗНЕЦОВ А.П., МИХАЙЛЮК А.В., ЦАРЁВ М.С., КРАВЧЕНКО В.В., ДЕШИН Д.А. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ЭЛЬФ»	396
П.А. КУЧУГОВ, С.И. ГЛАЗЫРИН, С.Ю. ГУСЬКОВ, Р.А. ЯХИН ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХМОЩНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИМЕНЕНИЕМ К ИССЛЕДОВАНИЯМ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ.....	397
Р.А. ЯХИН, Г.А. ВЕРГУНОВА, С.Ю. ГУСЬКОВ, Н.Н. ДЕМЧЕНКО, П.А. КУЧУГОВ, С.И. ГЛАЗЫРИН, А.В. БРАНТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ ЛАЗЕР-ПЛАЗМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИМЕНЕНИЕМ К ЗАДАЧАМ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА.....	398
К.Ф. БУРДОНОВ, А.А. СОЛОВЬЕВ, Р.С. ЗЕМСКОВ, М.В. СТАРОДУБЦЕВ ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ.....	399

Н.Г. БОРИСЕНКО, А.А. АКУНЕЦ, А.И. ГРОМОВ, В.М. ДОРОГОТОВЦЕВ, В.С. ЛИТВИН, А.В. ПАСТУХОВ, В.Г. ПИМЕНОВ*, С.М. ТОЛОКОННИКОВ МИШЕНИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА НА ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ЭЛЬФ	400
С.Г. БОЧКАРЕВ, А.В. БРАНТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ ЗАДАЧИ ПО СТОХАСТИЧЕСКОМУ НАГРЕВУ И УСКОРЕНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ/ИОНОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ПЛОТНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ, МИШЕНЕЙ С ПРЕПЛАЗМОЙ И СТРУКТУРИРОВАННЫХ МИШЕНЕЙ	401
Н.Е. АНДРЕЕВ, О.Н. РОЗМЕЙ ЗАДАЧИ ПО ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ СУПЕР-ПОНДЕРОМОТОРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ - ОСНОВА СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЧАСТИЦ	402

**Секция
ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции

– к.ф.-м.н., доцент
Петровский Виктор Николаевич

Секретарь секции

– к.ф.-м.н.,
Щекин Александр Сергеевич

E-mail: ASShchekin@mephi.ru

Е.В. ДВОРЕЦКАЯ, Р.Б. МОРГУНОВ

Федеральный исследовательский центр Проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

ЛОКАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ АМОРФИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МИКРОПРОВОДА PrDy-FeCo-B

Лазерно-стимулированная аморфизация поверхности микропроводов PrDy-FeCo-B может восстанавливать аморфную структуру поликристаллических микропроводов при однократном лазерном облучении, что позволяет печатать периодические локальные магнитные метки длиной ~ 10 μm .

E.V. DVORETSKAYA, R.B. MORGUNOV

Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia

LOCAL LASER AMORPHIZATION OF THE SURFACE OF POLYCRYSTALLINE MICROWIRE PrDy-FeCo-B

Laser-stimulated amorphization of the surface of PrDy-FeCo-B microwires can restore the amorphous structure of polycrystalline microwires with a single laser irradiation, which allows printing periodic local magnetic marks with a length of ~ 10 μm .

Микромагниты, используемые в робототехнических механизмах, приводах, электродвигущих устройствах, микродвигателях, требуют защиты от химически разрушающих факторов. Совершенствование микромагнитов семейства NdFeB особенно важно [1-4].

Аморфные микропровода PrDyFeCoB длиной ~ 1 см и диаметром ~ 50 μm получены при быстром охлаждении со скоростью около ~ 10⁶ K/s методом экстракции висящей капли расплава, нагретой высокоэнергетическим электронным пучком. Для формирования поликристаллической структуры исходно аморфные микропровода подвергались вакуумному отжигу при 900 °C в течение 2 h при давлении 10⁻⁵ Torr. Для локального лазерного профилирования микропровода после вакуумного отжига использовали излучение импульсного иттербийового волоконного лазера G-MARK100 с длиной волны 1070 nm, фокусируемое линзой Ф-100 (размер лазерного пятна 8–12 μm). Профилирование проводилось в воздухе при скорости перемещения лазерного луча 850 mm/s, мощностью $P \approx 16$ W, частотой импульсов 25 kHz, энергией одиночного импульса 1 mJ и длительностью 120 ns. Пример фрагмента микропровода, подвернутого лазерному облучению, приведен на рис. 1.

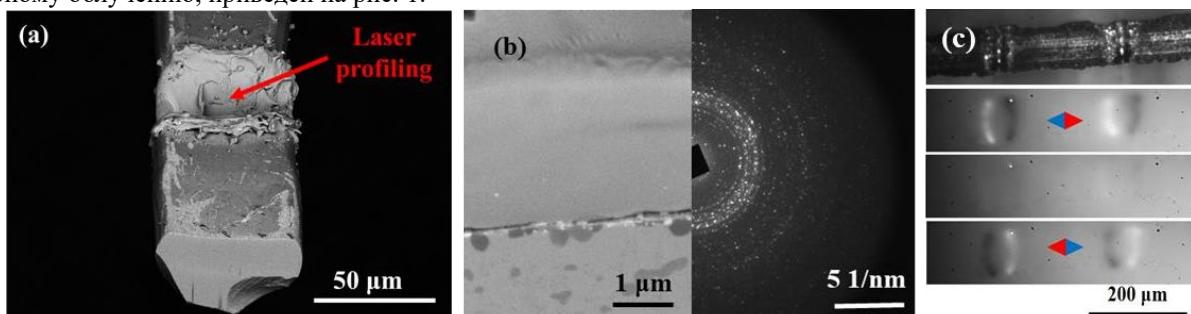


Рис. 1. SEM-изображение микропровода после вакуумного отжига и лазерного профилирования (а); SEM-изображение и соответствующая ему электронограмма для ламели из участка микропровода после лазерного профилирования (б); магнито-оптическое изображение микропровода с лазерными метками (темные и светлые области соответствуют разноименному направлению намагниченности) (с).

Аморфизированный (аморфно-кристаллический) материал микропровода демонстрирует сужение петли гистерезиса по сравнению с поликристаллическим микропроводом, а также появление поверхностных радиальных доменов, которые наблюдаются и в полностью аморфных микропроводах. В облученных областях зависимость скорости доменной стенки от поля согласуется с режимом ползучести, в котором доменная стенка термоактивационно преодолевает препятствия, которыми являются неоднородности аморфной фазы. В полностью аморфном микропроводе, не подвергавшемся облучению лазером и отжигу, зависимость скорости доменной стенки от поля немонотонна, а скорость движения на два порядка величины выше, чем в локальных аморфизированных областях. Это говорит о переходе режима ползучести в режим скольжения в полностью аморфных микропроводах, а также о разных механизмах торможения в полностью и частично аморфизованных микропроводах.

Работа выполнена в рамках гос.задания Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН 124013100858-3.

Список литературы

1. Dvoretskaya E.V., Morgunov R.B., Chernov A.I. // Mater. Lett. 2024. Vol. 377, P. 137408.
2. Dvoretskaya E., Morgunov R., Savin V. and others // JMMM 2024 Vol. 610, P. 172574.
3. Дворецкая Е.В., Моргунов Р.Б. // ФТТ 2024 Т. 66, № 11. С. 1998-2006.
4. Дворецкая Е.В., Моргунов Р.Б. // ФТТ 2024 Т. 66, № 11. С. 1895-1901.

А.П. ЛАСКОВНЕВ¹, М.И. МАРКЕВИЧ¹, В.И. ЖУРАВЛЕВА², А.Г. АНИСОВИЧ³, Д.Ж. АСАНОВ⁴

¹Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, e-mail: chaplanov@gmail.com

²Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь

³ Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

⁴ Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза Узбекистан

ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ СМЕСОВОЙ ТКАНИ И КЛАСТЕРОВ ЦИРКОНИЯ ПОСЛЕ ПРЕБЫВАНИЯ ЕГО В УСЛОВИЯХ АНТАРКТИДЫ

Представлены результаты исследований морфологии поверхности композиционного материала на основе смесовой ткани и кластеров циркония после пребывания в Антарктиде и последующего лазерного воздействия излучения лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10нс, частота следования импульсов 10Гц, энергия одиночного импульса~0,05Дж). Показано, что вследствие изменения структуры композиционного материала после пребывания в Антарктиде изменяется порог абляции материала.

A.P. LASKOVNEV¹, M.I. MARKEVICH¹, V.I. ZHURAVLEVA², A.G. ANISOVICH³, D.J. ASANOV⁴

¹Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: chaplanov@gmail.com

²Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

³Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

⁴Nukus State Pedagogical Institute named after Azhiniyaz Uzbekistan

LASER IMPACT ON COMPOSITE MATERIAL BASED ON MIXED FABRIC AND ZIRCONIUM CLUSTERS AFTER ITS STAY IN ANTARCTICA CONDITIONS

The results of studies of the morphology of the surface of a composite material based on a mixed fabric and zirconium clusters after a stay in Antarctica and subsequent laser exposure to the radiation of an aluomoittrium garnet laser (LS-2134D) with a wavelength of 1064 nm, generating in a two-pulse mode (pulses separated by a time interval of 3 microseconds, pulse duration 10ns, pulse repetition frequency 10 Hz, energy a single pulse of 0.05 J). It is shown that due to a change in the structure of the composite material after a stay in Antarctica, the ablation threshold of the material changes.

К основным экстремальным факторам Антарктиды следует отнести низкую температуру воздуха, доходящую на станции «Восток» до минус 88°C и высокое напряжение статического электрического поля Антарктиды вследствие трения снежных частиц во время сильного ветра и бурь и отсутствием разрядов атмосферного электричества с землей, которая изолирована ледяным покровом. Поэтому создание композиционных материалов на тканой основе, модифицированной кластерами металлов, представляется важной и актуальной задачей.

Цель работы – исследование морфологии поверхности композиционного материала на основе смесовой ткани и кластеров циркония, побывавшем в Антарктиде и подвергнутом воздействию лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме.

Ткань 07C11-КВ применяется в широком диапазоне положительных и отрицательных температур, она формоустойчива, мягкая и пластиичная, хорошо драпируется. Состав сырья ткани: полиэфир - 67%, вискоза – 33%. Кластеры циркония осаждались на ткань в вакууме с использованием источника стационарной металлической плазмы, работающего в режиме сепарации. Процесс проводился путем чередования периодов работы источника плазмы (1 минута) и паузы для охлаждения ткани (1 минута). Образцы облучали лазерным излучением в интервале энергий 2-15 Дж при временах экспозиции от 2 до 15 секунд.

Показано, что после испытаний в климатических условиях Антарктиды (3 месяца непрерывного нахождения в естественных условиях) изменяется структура композиционного материала, изменяется порог абляции материала. При увеличении вложенной энергии до 10 Дж наступает плавление и перфорация ткани, образуется отверстие диаметром примерно 1800 мкм, что значительно больше, чем при лазерном воздействии на такой же композиционный материал, но без пребывания в условиях Антарктиды.

Список литературы

1. Goodhew, P. J. Electron Microscopy and Analysis /P. J. Goodhew, J. Humphreys, R. Beanland - New York: Taylor & Francis, 2001. - 251p

А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Э.Р. ТОЛОРДАВА, Е.В. УЛТУРГАШЕВА, С.Н. ШЕЛЫГИНА,
И.Н. САРАЕВА, С. П. БАБИНА, С. И. КУДРЯШОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

ОЦЕНКА БИОТОКСИЧНОСТИ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ IN-VIVO

В работе была проведена оценка скорости заживления ран на белых лабораторных мышах Balb/C после нанесения антибактериальных наночастиц меди с поверхностной массовой плотностью $\approx 80 \text{ мкг/см}^2$ методом лазерно-индукционного прямого переноса с медной пленки толщиной 100 нм. Для сравнения в качестве контроля использовалась группа мышей с ранами без обработки. В результате было показано, что наночастицы меди обладают ранозаживляющим эффектом, при этом не приносящим вред самим мышам.

A.A. NASTULYAVICHUS, E.R. TOLORDAVA, E.V. ULTURGASHEVA, S.N. SHELYGINA, I.N. SARAeva,
S. P. BABINA, S.I. KUDRYASHOV

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

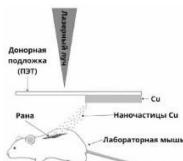
EVALUATION OF BIOTOXICITY AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF COPPER NANOPARTICLES IN IN-VIVO STUDIES

The work assessed the rate of wound healing on white laboratory mice Balb/C after application of antibacterial copper nanoparticles with a surface mass density of $80 \mu\text{g/cm}^2$ by laser-induced direct transfer from a copper film 100 nm thick. For comparison, a group of mice with untreated wounds was used as a control. As a result, it was shown that the nanoparticles have a wound-healing effect, while not causing harm to the mice themselves.

Несмотря на достижения медицины, раны остаются серьезной проблемой, поскольку их заживление часто осложняется инфекциями и образованием бактериальных биопленок, что затрудняет антибиотикотерапию [1]. Заживление представляет собой сложный процесс, требующий координации клеточных событий, применение антисептиков должно учитывать их переносимость и поддержку регенерации тканей [2]. Современные методы лечения, включая нанотехнологии и использование наночастиц, таких как серебро, медь и цинк, демонстрируют перспективные результаты в борьбе с инфекциями и ускорении заживления [3].

В исследовании оценивалось заживление кожных ран у мышей породы Balb/C с использованием медных наночастиц, наносимых методом лазерно-индукционного прямого переноса (рис.1). Наночастицы получали с медной пленки толщиной 100 нм при плотности энергии 6 Дж/см². Поверхностная массовая плотность составляла

$\approx 80 \text{ мкг/см}^2$. Эксперимент проводился на самцах мышей весом 18–20 г. Все животные были акклиматизированы в лаборатории за 7 дней до начала эксперимента. Для создания ран депилированную кожу срезали до полной глубины на площади 50 мм².



Rис. 1. Схема эксперимента

Животные были разделены на две группы: контрольную, где раны не обрабатывались, и экспериментальную, где на раны наносились наночастицы меди. Площадь ран измерялась планиметрическим методом с последующей цифровой обработкой в программе ImageJ. Наблюдения проводились в течение 4 дней, а скорость заживления оценивалась по изменениям площади ран.

Результаты показали, что использование наночастиц меди ускоряет заживление: у экспериментальной группы полное эпителилизование происходило на 3 дня быстрее, чем у контрольной. Побочные эффекты, такие как отеки, зуд или изменения поведения, не наблюдались. Анализ подтвердил, что наночастицы меди безопасны для применения.

Медные наночастицы демонстрируют перспективность в качестве компонента антисептических перевязочных материалов, способствуя ускорению регенерации тканей и предотвращению инфекций.

Благодарность: «Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-25-00512)»

Список литературы

1. Markiewicz-Gospodarek A., M. Kozioł, M. Tobiasz and others // Int. J. Environ. Res. Public Health 2022. Vol. 19, № 3, P. 1338.
2. E. V. Muromtseva, K. I. Sergatsky, V. I. Nikolsky and others // News High. Educ. Inst. Volga Reg. Med. Sci. 2022. Vol. 3, P. 93- 109.
3. S. Hamdan, I. Pastar, S. Drakulich and others // ACS Cent. Sci. 2017. Vol. 3, № 3, P. 163-175.

В.П. БИРЮКОВ¹, А.Н. МИРЯХА²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²ООО «Научно-производственное предприятие «Инжект», г. Саратов, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКАМИ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ НАПЛАВКЕ

В работе рассмотрен технологический процесс широкополосной лазерной наплавки стали 20Х13 порошком 20Х13 и с добавками карбида вольфрама прямоугольным лазерным пятном с размерами 24×6 мм при щелевой подаче порошков с помощью питателя, содержащего две колбы. Испытания на абразивное изнашивание незакрепленным зерном кварцевого песка показали повышение стойкости образцов с увеличение концентрации упрочняющей фазы.

V.P. BIRYUKOV¹, A.N. MIRYAKHA²

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²INJECT RME LLC, Saratov, Russia

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF COATINGS WITH CARBIDE PHASE ADDITIVES DURING LASER BROADBAND SURFACING

The paper considers the technological process of broadband laser surfacing of 20Kh13 steel with 20Kh13 powder and with the addition of tungsten carbide with a rectangular laser spot with dimensions of 24×6 mm with a slotted powder supply using a feeder containing two flasks. Tests for abrasive wear with loose quartz sand grains showed an increase in the resistance of the samples with an increase in the concentration of the hardening phase.

При лазерной наплавке прямоугольным пятном шириной 10 мм порошка NiCrMo с добавкой карбида вольфрама (WC) стали SS316L было установлено, что износостойкость покрытия выше, чем при наплавке круглым пятном диаметром 5,5 мм [1].

В работе представлены результаты широкополосной наплавки полупроводниковым технологическим лазером PLD-6 производства ООО «НПП» ИНЖЕКТ в среде аргона образцов стали 20Х13 с размерами 40×100×20 мм при мощности лазерного излучения 5,6 кВт, скорости сканирования луча 3 мм/с с различным расходом подачи порошков 20Х13 и WC при их соотношении 1:0, 2:1 и 1:1. Размер лазерного пятна оставлял 24×6 мм. Для подачи порошка использовались двухщелевая насадка и питатель, содержащий две колбы. Для изготовления шлифов образцы разрезали перпендикулярно дорожкам наплавки. Испытания на абразивное изнашивание проводили по схеме:

«образующая поверхность резинового диска-прямоугольный плоский образец с широкополосной наплавкой» при гравитационной подаче в зону трения кварцевого песка с размером частиц 200-600 мкм между вращающимся резиновым кругом и неподвижно закрепленным образцом с наплавленным покрытием. Продолжительность цикла испытаний составляла 10 минут при нагрузке 15 Н.

На рис. 1 представлен микрошлиф единичной наплавленной дорожки с толщиной и шириной слоя 1,25 и 22,3 мм порошком 20Х13.



Рис. 1. Микрошлиф единичной наплавленной дорожки порошком 20Х13

Повышение концентрации карбида вольфрама в композиционном покрытии приводило к повышению абразивной стойкости образцов.

Список литературы

1. Yao J., Zhang J., Wu G., Wang L. and others //Optics & Laser Technology. 2018. vol. 101. p. 520-530

В.П. БИРЮКОВ¹, А.Н. МИРЯХА², А.А. ЯКУБОВСКИЙ¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²ООО «Научно-производственное предприятие «Инжект», Саратов, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЗАКАЛКИ СТАЛИ 25 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР ТРЕНИЯ

В работе рассмотрен технологический процесс широкополосной лазерной закалки стали 25 прямоугольным лазерным пятном с размерами 28×7 мм. Испытания интенсивность изнашивания были выполнены по схеме: «прямоугольный плоский образец с лазерной широкополосной закалкой-торец кольцевого контробразца втулки (сталь 45) при нормальном давлении 1 МПа. Износостойкость образцов повышалась с увеличением микротвердости дорожек закалки.

V.P. BIRYUKOV¹, A.N. MIRYAKHA², A.A. YAKUBOVSKY¹

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²INJECT RME LLC, Saratov, Russia

USE OF LASER BROADBAND HARDENING OF STEEL 25 TO INCREASE THE WEAR RESISTANCE OF FRICTION PAIRS

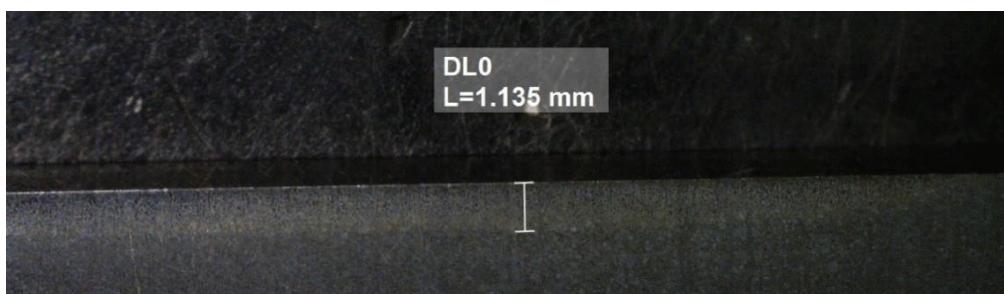
The paper considers the technological process of broadband laser hardening of steel with a 25 rectangular laser spot with dimensions of 28×7 mm. The wear intensity tests were performed according to the scheme: "rectangular flat sample with laser broadband hardening-the end of the annular counter sample of the sleeve (steel 45) at a normal pressure of 1 MPa. The wear resistance of the samples increased with an increase in the microhardness of the quenching tracks.

Лазерное упрочнение стали AISI4130 Nd:YAG лазера при максимальной мощности 3,5 кВт, частоте 7 Гц, скорости сканирования 5 мм/с были получены максимальная глубина и ширина упрочнения зон 0,4 и 2 мм соответственно с твердостью мартенситных структур 650 HV [1].

В работе представлены результаты широкополосной закалки полупроводниковым технологическим лазером PLD-6 производства ООО «НПП» ИНЖЕКТ» образцов стали 25 с размерами 40×80×15 мм при мощности лазерного излучения 4,2-5,4 кВт, скорости сканирования луча 5-8 мм/с, размере лазерного пятна 28×7 мм. Шлифы изготавливали по стандартной методике. Испытания на интенсивность изнашивания проводили по схеме:

«прямоугольный плоский образец с лазерной закалкой-торец кольцевого контробразца (сталь 45, HRC49-54)». Испытания были выполнены при частоте вращения шпинделя машины трения 400 мин⁻¹ и нормальном давлении 1 МПа.

На рис. 1 представлен микрошлиф единичной закаленной лазером единичной дорожки стали 25 с глубиной и шириной слоя 1,135 и 27 мм соответственно. Микротвердость дорожек лазерной закалки изменялась в пределах 4750-6760 МПа в зависимости от режимов обработки.



Rис. 1. Микрошлиф единичной закаленной диодным лазером дорожки стали 25

Износостойкость образцов повышалась с увеличением микротвердости закаленных диодным лазером дорожек.

Список литературы

1. Bakhtiari M., Fayazi Khanigi, A. Farnia, A.// Arab J Sci Eng. 2023. vol.48, 11801–11818

М.Д. ВАСИЛЬЕВ, А.А. МАШАРСКАЯ, А.С. ХРАМОВ, Р.М. МУХСИНОВА, Д.А. СИНЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ГИБКИХ МАТЕРИАЛАХ КАК ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИЙ

Показана возможность измерения значений деформаций различного вида оптическим методом при помощи гибких дифракционных оптических элементов на основе лазерно-индукционных периодических поверхностных структур (ЛИППС). Оценены статистические зависимости и повторяемость результатов оптического тензометрического отклика ЛИППС на тонких металлических пленках на полимерных подложках.

M.D. VASILEV, A.A. MASHARSKAYA, A.S. KHRAMOV, R.M. MUKHSINOVA, D.A. SINEV
ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

LASER-INDUCED PERIODIC SURFACE STRUCTURES ON FLEXIBLE MATERIALS AS A STRAIN SENSOR

The possibility of measuring deformation values of various types by optical method using flexible diffractive optical elements based on laser-induced periodic surface structures (LIPSS) is demonstrated. Statistical dependencies and repeatability of the results of optical strain-measuring response of LIPPS on thin metal films on polymer substrates have been evaluated.

Задачи отслеживания деформаций различных поверхностей и степени смещения подвижных элементов предъявляют высокие требования к точности и дешевизне их измерений. В то же время современные методы тензометрических измерений и устройства, основанные на них, этим требованиям не соответствуют ввиду значительного роста стоимости при повышении точности и качества детекторов. Вследствие этого наблюдается проблема ограничения сфер применения тензометрических устройств. Одновременное повышение точности и снижение стоимости может быть достигнуто за счет использования дифракционных решеток на гибких полимерных материалах в качестве тензочувствительных элементов. Значения деформации при этом снимаются путем анализа дифракционных картин при засветке низкоинтенсивным сигнальным лазерным излучением.

В настоящей работе предложена возможность использования лазерно-индукционных периодических поверхностных структур (ЛИППС), формирующихся в окислительных режимах на тонких титановых пленках толщиной 30 нм, напыленных на полимерных подложках толщиной 200 мкм, в качестве чувствительных дифракционных элементов. Период исследуемых структур составляет $T = 660 \pm 40$ нм и соизмерим с λ/n (где λ – длина волны возбуждающего излучения, n – показатель преломления подложки).

В представленном исследовании демонстрируются статистические зависимости величин оптического отклика на растяжение и изгиб различных образцов, подготовленных по одной методике и имеющих одинаковые габаритные характеристики. Кроме того, показана зависимость деградации измерительных элементов при приложении повторных деформаций к образцам. В качестве элементов для актуализации величин погрешностей такого метода тензометрических измерений были использованы образцы размером 10×25 мм с размером обработанной области 1×1 мм (рис.1). В качестве источника освещения использовался диодный лазер с длиной волны $\lambda=532$ нм.

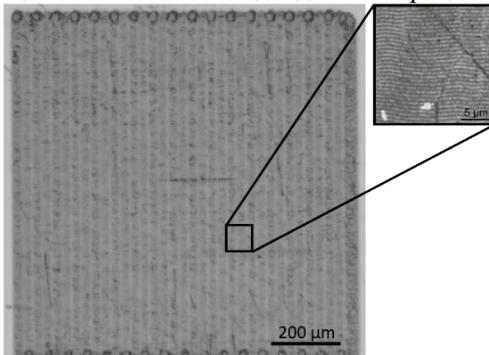


Рис. 1. Микрофотография тензочувствительного сегмента на основе ЛИППС

В результате проведения исследования продемонстрированы зависимости тензометрического отклика ЛИППС на гибких подложках, а также восстановляемость чувствительных элементов после многократных деформаций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10230, <https://rscf.ru/project/24-79-10230/>. Авторы благодарят Институт лазерных технологий Университета ИТМО за поддержку НИР магистрантов и аспирантов. Авторы благодарят ресурсный центр «Нанотехнологии» СПбГУ за помощь в получении образцов титановых пленок на гибких диэлектрических подложках.

Д.В. Виноградов¹, Д.А. Белов², А.В. Иконников², Р.А. Хабибуллин¹

¹Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

МИКРОДИСКОВЫЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА МОДАХ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование терагерцовых квантово-каскадных лазеров (ТГц ККЛ) на основе микродискового резонатора с модами шепчущей галереи (МШГ). Моделирование распределения полей для МШГ позволило найти моды с наибольшей интенсивностью излучения для разных диаметров микродисков. Проведенное моделирование хорошо согласуется с измеренными спектрами генерации ТГц ККЛ.

D.V. Vinogradov¹, D.A. Belov², A.V. Ikonnikov², R.A. Khabibullin¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

MICRODISK TERAHERTZ QUANTUM CASCADE LASERS BASED ON WHISPERING GALLERY MODES

Theoretical and experimental studies of terahertz quantum cascade lasers (THz QCLs) based on a microdisk resonator with whispering gallery modes (WGMs) have been carried out. Modeling of the field distribution for WGMs has allowed us to find modes with the highest radiation intensity for different microdisk diameters. The modeling is in good agreement with the measured THz QCL generation spectra.

Лазеры на микродисках, основанные на модах шепчущей галереи (МШГ), привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным высокодобротным модам, которые циркулируют по кругу резонатора, распространяясь под скользящими углами.

В работе рассматриваются два микродисковых ТГц ККЛ с диаметрами 50 мкм и 100 мкм и высотой (толщиной активной области GaAs/AlGaAs) равной 15.3 мкм. Поле внутри микродиска может быть найдено с помощью скалярного уравнения Гельмгольца, записанного в цилиндрических координатах: $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + k^2 E = 0$, решением которого будет функция: $E(r, \phi, z) = J_m(r\sqrt{k^2 - \beta^2}) e^{\pm im\phi \pm i\beta z}$, β – постоянная распространения вдоль оси z , но так как мы ищем собственные моды резонатора, которые не зависят от z ($\beta = 0$) [1], таким образом: $E_r = C_0 J_m \left(\frac{2\pi n r}{\lambda_{m,q}} \right) e^{im\phi}$, [2]. Длины волн таких собственных мод можно вычислить по формуле: $\lambda_{m,q} = \frac{2\pi R n}{T_{m,q}}$, где R – радиус цилиндра, n – показатель преломления среды резонатора ($n = 3.7 \neq n(\lambda)$), $T_{m,q}$ – корни порядка q функции Бесселя с индексом m . При помощи Comsol Multiphysics были найдены собственные длины волн и проведен расчёт полей, соответствующих этим длинам волн. Интегрирование плотности излучательной энергии по боковой поверхности цилиндра позволяет определить вклад моды в интегральный оптический сигнал, измеряемый внешним детектором. На Рис. 1 приведены результаты моделирования и спектры генерации микродисковых ТГц ККЛ.

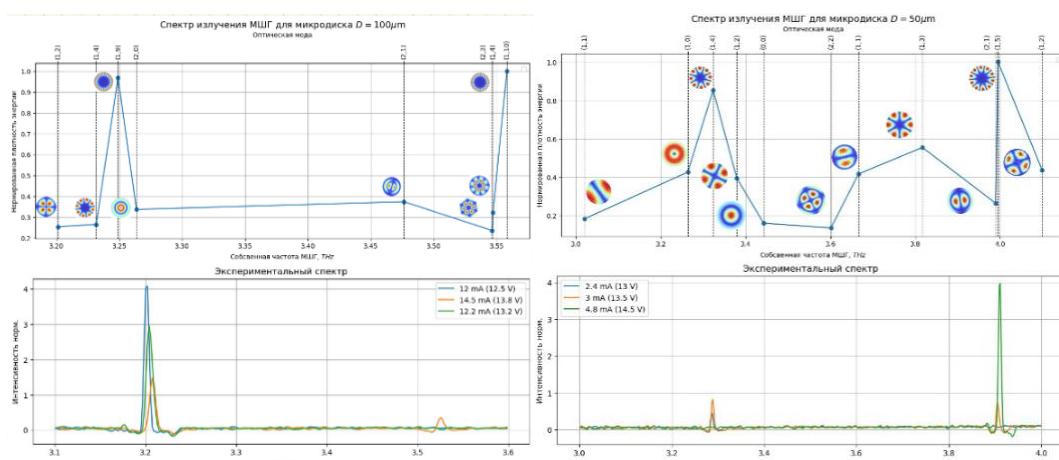


Рис. 1. Результаты моделирования нормированной плотности энергии МШГ и измеренные спектры генерации микродисковых ТГц ККЛ.

Список литературы

1. Н. В. Крыжановская, М. В. Максимов, А. Е. Жуков, Квантовая электроника. 2014. том 44, номер 3, 189–200.
2. G. Fasching et al., IEEE Journal of Quantum Electronics. 2007. vol. 43, no. 8, pp. 687–697.

С.Ю. ГАВРИЛОВ, А.И. ХИРЬЯНОВА, Е.В. ПАРКЕВИЧ

Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН), Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОГРАММ ТРЕХМЕРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРВОГО РЫТОВСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

Рассмотрены возможности по моделированию дифракции плоской электромагнитной волны на длине волны 532 нм на фазовой микроструктуре, представляющей из себя осесимметричный объемный плазменный цилиндр диаметром 20 мкм с плавным профилем диэлектрической проницаемости, с целью получения интерференционных картин. Получены интерферограммы на расстояниях до 10 тыс. мкм от объекта. Проведена оценка необходимых для моделирования параметров расчетной сетки, таких как минимальный размер шага и масштаб расчетной сетки для наперед заданного расстояния вдоль направления распространения волны.

S.IU. GAVRILOV, A.I. KHIRYANOVA, E.V. PARKEVICH

The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS), Moscow, Russia

MODELING INTERFEROGRAMS OF THREE-DIMENSIONAL PLASMA MICROSTRUCTURES USING THE FIRST RYTOVSK APPROXIMATION

The possibilities of modeling the diffraction of a plane electromagnetic wave at a wavelength of 532 nm on a phase microstructure representing an axisymmetric plasma volume cylinder with a diameter of 20 μm and a smooth permittivity profile are considered in order to obtain interference patterns. Interferograms are obtained at distances of up to 10 thousand μm from the object. An assessment is made of the parameters of the computational grid required for modeling, such as the minimum step size and the scale of the computational grid for a predetermined distance along the direction of wave propagation.

Моделирование интерферограмм представляет широкий прикладной интерес для различных применений в науке и технике, как, например, подтверждение результатов диагностики плазмы при помощи лазерного зондирования [1]. Одной из современных проблем обработки интерферограмм плазменных микрообъектов является возможное наличие ошибки при расчете электронной плотности, связанной с дифракцией электромагнитного излучения и вызванной выходом микрообъекта из области резкости оптической системы во время исследования [2]. Совершенствование методов моделирования дифракции на неоднородных плазменных микрообъектах в будущем позволит развить новые методы подтверждения результатов экспериментальных измерений, учитывающие дифракционные эффекты, вызванные дефокусировкой, и откроет дорогу к многоракурсовой лазерной томографии быстро эволюционирующих (порядка наносекунды) фазовых микрообъектов (например, искровых разрядов). Кроме того, рассчитанные интерферограммы плазменных микроструктур могут помочь при создании программ автоматизированной обработки интерферометрии.

Для моделирования дифракции на фазовом микрообъекте было выбрано особенно чувствительное к фазовому контрасту первое Рытовское приближение [3]. Объектом для моделирования прямой задачи был выбран плазменный цилиндр (филамент), аналогичный по своим характеристикам наблюдаемому в экспериментальной работе в статье [4]. В результате моделирования удалось получить интерферограммы на расстояниях до 10 тыс. мкм от объекта и дать характеристику влияния параметров сетки на ошибку при моделировании дифракции. Дополнительно был сделан задел для моделирования интерферограмм сферических плазменных микрообъектов, описанных в работе [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 24-79-10167).

Список литературы

1. Khirianova A.I., Parkevich E.V., Medvedev M.A. // J Russ Laser Res 2020. 41, 141–148.
2. Parkevich E. V., Khirianova A. I., Khirianov T. F. and others //Phys. Rev. E. 2024. T. 109. №. 5. C. 055204.
3. Chaumet P. C., Sentenac A., Zhang T. //J of Quant. Spectr. and Rad. Trans. 2020. T. 243. C. 106816.
4. Parkevich E. V., Medvedev M. A., Ivanenkov G. V. and others //Plasma S. Sci. and Tech. 2019. T. 28. №. 9. C. 095003.

А.А.ГРИГОРЬЕВ^{1,2}, А.А. ФРОНЯ^{1,2}, Е.И. МАВРЕШКО^{1,2}, С.В. ГЛИНСКАЯ

1 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

2 Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ АБЛЯЦИИ В МЕДИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Проведен эксперимент и моделирование лазерного нагрева медной мишени импульсным наносекундным лазерным излучением. Изучены следы воздействия, определены пороги лазерной абляции. Построены тепловые профили, возникающие при последовательном облучении в разных точках мишени и определен вклад в нагрев мишени от соседних областей облучения.

A.A. GRIGORIEV^{1,2}, A.A. FRONYA^{1,2}, E.I. MAVRESHKO^{1,2}, S.V. GLINSKAYA¹

1 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

2 N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

STUDYING OF ABLATION PROCESSES IN COPPER DURING PULSE LASER PROCESSING

An experiment and modeling of laser heating of a copper target by pulsed nanosecond laser radiation were conducted. Traces of the effect were studied, laser ablation thresholds were determined. Thermal profiles arising during successive irradiation at different points of the target were constructed, and the contribution to the heating of the target from adjacent irradiation areas was determined.

Быстрый прогресс в области нанотехнологий и биомедицины открывает новые возможности для исследований и разработок, направленных на повышение эффективности и результативности методов диагностики и лечения различных заболеваний. Одним из направлений в этой области является синтез наночастиц, которые могут быть применены в биомедицине [1].

Исследуя процессы лазерного синтеза наночастиц, стоит задача изучения порогов лазерной абляции для оптимального использования энергии лазерного излучения, генерации наночастиц с требуемыми параметрами, определения оптимальных условий синтеза с высокой производительностью. В качестве многообещающего и активно исследуемого материала для синтеза наночастиц для биомедицинских применений является медь. Медь является важным микроэлементом, играющим ключевую роль во многих биологических процессах человеческого организма [2]. Она участвует в обмене веществ, формировании крови, функционировании иммунной системы и других важных процессах. Исследования показывают, что наночастицы на основе меди демонстрируют биосовместимость и могут быть успешно применены в медицине без негативного воздействия на организм [3]. Эти частицы могут быть использованы для создания новых методов диагностики, лечения инфекционных заболеваний, антиканцерогенных терапий и других медицинских целей.

В данной работе представлены результаты эксперимента по воздействию наносекундного лазерного излучения на медную мишень. Лазерное излучение фокусировалось на медную мишень. Далее проводилось облучение поверхности при различных расстояниях между последовательно идущими пятнами воздействия. На основе анализа следов воздействия при различных энергиях лазерного излучения определены пороги лазерной абляции. Также приводятся результаты моделирования создаваемых лазерным излучением тепловых полей в процессе нагрева.

Список литературы

1. Maliki, M., Ifijen, I.H., Ikhuoria, E.U. et al. Copper nanoparticles and their oxides: optical, anticancer and antibacterial properties. Int Nano Lett 12, 379–398 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40089-022-00380-2>
2. Парафонский А.П. Роль меди в организме и значение ее дисбаланса // ЕГИ. — 2015. — №4. — С. 10.
3. Luu, ND.H., Nguyen, M.N., Dang, L.H. et al. Antibacterial and biocompatible wound dressing based on green-synthesized copper nanoparticles and alginate. Journal of Materials Research 39, 955–967 (2024). <https://doi.org/10.1557/s43578-024-01283-y>

А.Ю. ДАНИЛОВ¹, Г.Ю. ИВАНОВ², С.П. НИКИТИН³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³Общество с ограниченной ответственностью «Т8», Москва, Россия

ВЫСОКОКОГЕРЕНТНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С РАСШИРЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ, СЕНСОРИКИ И СИСТЕМ ВОЛОКОННОЙ СВЯЗИ

Рассмотрены конструктивные особенности узкополосных волоконных лазеров с перестраиваемой длиной волны генерации. Теоретически и экспериментально показана возможность расширения диапазона температурной перестройки таких лазеров с помощью описываемых конструкционных решений.

A.Y. DANILOV¹, G.Y. IVANOV², S.P. NIKITIN³

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²National Research University MIPT (Moscow Institute of Physics and Technology), Moscow, Russia

³«Т8» LLC, Moscow, Russia

HIGHLY COHERENT FIBER LASER WITH EXTENDED THERMAL TUNABILITY RANGE FOR METROLOGY, SENSORICS AND FIBER COMMUNICATION SYSTEMS

Design features of wavelength tunable narrow-linewidth fiber lasers are considered. Expansion of thermal tuning range for such lasers by using described mechanical solutions is demonstrated both theoretically and experimentally.

В современных системах коммуникации, устройствах сенсорики и метрологии одним из ключевых компонентов является высоко когерентный лазер (с шириной линии генерации менее 1 кГц). Для создания таких источников часто используются волоконные лазеры [1], узкополосный режим генерации которых обеспечивается волоконной брэгговской решеткой (ВБР) [2]. При этом, для многих задач требуется возможность перестройки такого лазера по длине волны [3], что может быть достигнуто механической деформацией ВБР или изменением её температуры [4]. В последнем случае температурный коэффициент перестройки лазера определяется коэффициентом теплового расширения кварцевого волокна, в котором сформирована ВБР, а также температурным изменением показателя преломления.

В данной работе реализован волоконный одночастотный лазер, механическая конструкция которого позволяет увеличить диапазон температурной перестройки за счет использования алюминиевой подложки, в которой жестко закреплено волокно с ВБР. При использовании данной конструкции, коэффициент и диапазон температурной перестройки лазера определяется коэффициентом температурного расширения и модулем Юнга материала подложки. Теоретический анализ, проведенный с помощью пакета COMSOL, позволил смоделировать возникающие при нагреве механические напряжения, как в самой ВБР, так и в удерживающей ее алюминиевой подложке, и подтвердил возможность перестройки в диапазоне $\approx 2\text{ нм}$ при изменении температуры от $+10^\circ\text{C}$ до $+80^\circ\text{C}$. Проведен эксперимент, в рамках которого с хорошей точностью была подтверждена созданная численная модель такого лазера. Результаты эксперимента подтверждают вывод о том, что изменение материала подложки и способа крепления волокна с ВБР позволяют управлять перестроичной кривой $\lambda(T)$. Полученные результаты могут быть использованы при создании перестраиваемых лазерных систем для применения в различных областях, в частности в метрологии, сенсорике и системах связи.

Список литературы:

1. Martinez A., Dubov M., Khrushchev I., Bennion I. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser // Electronics Letters. 2004. Vol. 40, no. 19. P. 1170.
2. Turitsyn S. K., Babin S. A., Churkin D. V. et al. Random distributed feedback fibre lasers // Physics Reports. 2014. Vol. 542, no. 2. Pp. 133-193..
3. Ширманкин Андрей В., Камынин В. А. Перестраиваемый лазер с использованием оптического фильтра на основе конического волокна // Тезисы докладов Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели». 2024. №1.
4. Hartog, A.H. (2017). An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>

М.А. КАРДАПОЛОВА, Н.И. ЛУЦКО, Л.И. ПИЛЕЦКАЯ
Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ПОСТУПАЮЩЕЙ В ЕДИНИЧНЫЙ ВАЛИК НА ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

В статье исследуется влияние энергии, поглощенной материалом единичных валиков на микротвердость. Показано, что поступающая в валик энергия заметно влияет на зависимость средней микротвердости от скорости наплавки.

M.A. KARDAPOLOVA, N.I. LUTSKO, L.I. PILETSKAIA
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

INFLUENCE OF ENERGY ENTERING A SINGLE BEAD ON THE CHANGE IN MICROHARDNESS DURING LASER CLADDING WITH TRANSVERSE SCANNING

The article examines the effect of energy absorbed by the material of single beads on microhardness. It is shown that the energy supplied to the bead significantly affects the dependence of the average microhardness on the cladding speed.

Практическое применение волоконных лазеров, обладающих высоким коэффициентом поглощения излучения, в целях лазерной наплавки потребовало применения систем программно управляемого сканирования для решения проблемы расфокусировки излучения до технологически допустимых пределов [1]. При этом не только расширились технологические возможности метода лазерной наплавки, но и значительно изменились свойства получаемых покрытий.

В данной работе изучалось влияние поглощенной единичным валиком энергии на микротвердость валиков из никелевого сплава ПГ-12Н-01 при изменении скорости наплавки. Валики наносились на образцы из стали 45 с помощью волоконного лазера мощностью 1000 Вт, оснащенного 2D сканером фирмы «Ситела». Микротвердость материала валиков исследовалась с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г.

Полученные результаты приведены на рис. 1. Видно, что для всех исследованных режимов наплавки средняя микротвердость в валиках из сплава ПГ-12Н-01 уменьшается с увеличением скорости наплавки, что связано с уменьшением удельной энергии, поступающей в валик. Для валиков, наплавленных при мощности 1000 Вт при небольших скоростях наплавки микротвердость практически не изменяется, оставаясь на уровне 4900 МПа из-за образования плотной микроструктуры, но затем при увеличении скорости наплавки, удельная энергия уменьшается и микротвердость снижается до 3700 МПа. При мощности излучения 800 Вт происходит медленное уменьшение микротвердости с 4500 МПа до 4350 МПа. При этом, при скоростях наплавки больше 120 мм/мин, микротвердость валиков, полученных при мощности 800 Вт превышает микротвердость валиков, полученных при мощности 1000 Вт, что связано с большей скоростью охлаждения материала и меньшей диффузией железа из основы.

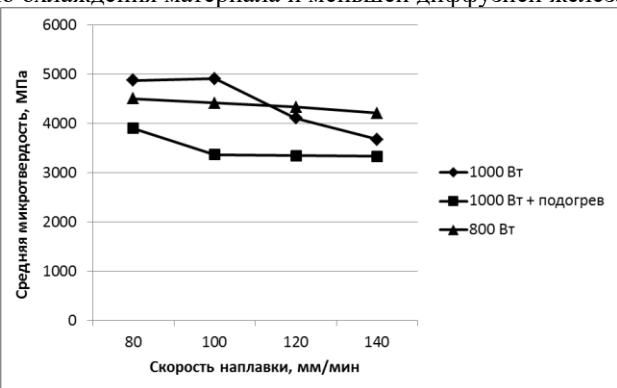


Рис. 1. Зависимости средней микротвердости от скорости наплавки

Микротвердость валиков, полученных при мощности 1000 Вт с применением предварительного подогрева основы до 300 °C имеет меньшую величину, чем в предыдущих случаях (3900 – 3300 МПа). Скорее всего, предварительный подогрев снижает скорость охлаждения материала валиков, приводя к уменьшению количества высокотемпературных фаз с высокой микротвердостью, и, одновременно, увеличивает диффузию железа из основы в валик, что также ведет к уменьшению микротвердости.

Список литературы

- Palmer, T.A. Implementation of Laser Cladding for Virginia Class Submarine Main Propulsion Shaft Repair/ T.A. Palmer// In book: Commercial Technologies for Maintenance Activities CTMA 2010 Symposium, Quantico, 2010: proceedings. Quantico: Pensilvania State University, 2010. – P. 22-24.

С.С. АНУФРИК, А.П. ВОЛОДЕНКОВ, К.Ф. ЗНОСКО
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ЭКСИПЛЕКСНОГО ЛАЗЕРА С ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИЕЙ 3 ДЖ

Представлены результаты исследования временных характеристик мощного XeCl-лазера. Особенностью лазера является модульное выполнение системы возбуждения разряда. Установлены зависимости временных характеристик лазера от параметров системы возбуждения. Получены максимальная энергия генерации ~3 Дж при длительности импульса ~120 нс.

S.S. ANUFRIK, A.P. VOLODENKOV, K.F. ZNOSKO
Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

TEMPORAL CHARACTERISTICS OF AN ELECTRIC DISCHARGE EXCIPLEX LASER WITH AN OUTPUT ENERGY OF 3 J

The results of the study of the time characteristics of a powerful XeCl laser are presented. A special feature of the laser is the modular implementation of the discharge excitation system. The dependences of the laser time characteristics on the excitation system parameters are established. The maximum generation energy of ~3 J with a pulse duration of ~120 ns are obtained.

Несмотря на то, что в УФ области спектра существует ряд источников когерентного наносекундного излучения, электроразрядные эксиплексные лазеры являются одними из самых мощных [1-2]. Они находят все большее практическое применение в науке, технике, производстве, а их разработка и исследование является актуальной задачей. Электрическая схема и конструкция XeCl лазера описаны в [3]. При его разработке использовались результаты исследования лазеров меньшей мощности и эксиламп [4-6]. Для моделирования характеристик лазера применялись подходы подобные [7-8]. Особенностью лазера является использование шести модулей работающих синхронно на межэлектродный промежуток в 70 мм. Это позволило снизить рабочее напряжение до 20-36 кВ. Получено значение энергии генерации 3 Дж на смеси HCl:Xe:Ne – 1:15:3000 при ее давлении 4 атм. и напряжении 36 кВ.

На рис. 1 приведены осциллограммы напряжения на электродах (U), разрядного тока (I) и импульса генерации (J) XeCl-лазера с нормировкой на максимум каждой величины. Осциллограммы напряжения на электродах и разрядного тока имели колебательную структуру, обусловленную наличием обострительной емкости. Задержка начала разряда зависела от давления активной среды и зарядного напряжения и изменялась от 90 нс до 160 нс.

Амплитуда тока основного разряда слабо зависела от давления и состава рабочей среды и в основном определялась величиной обострительной емкости. Основной энерговклад в разряд происходил в течение первой полуволны разрядного тока. Генерация начиналась с задержкой ~15 нс от начала пробоя межэлектродного промежутка. Импульс генерации имел крутой фронт, небольшое плато, пологий спад и «хвост», обусловленный током разряда емкостей после их перезарядки. Длительность импульса генерации зависела от параметров разрядного контура и величины зарядного напряжения. При максимальной выходной энергии она составляла ~120 нс по полувысоте. Форма и длительность импульсов генерации коррелировали с импульсами и амплитудой разрядного тока. Использование других рабочих сред и смена зеркал резонатора позволит расширить спектральный диапазон генерируемого излучения.

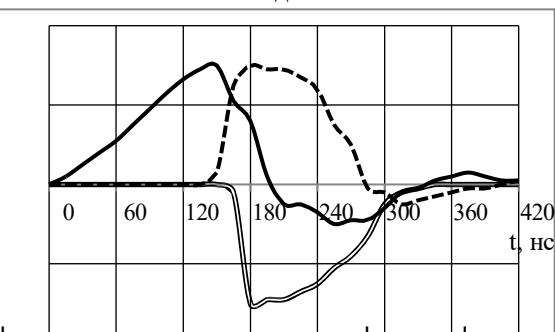


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на электродах (U), разрядного тока (I) и импульса генерации (J) XeCl-лазера

Список литературы

1. Delmdahl R., Patzel R. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. No 3. P. 034004.
2. Дударев В.В., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н. и другие // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 8. С. 687-691.
3. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Володенков А.П. // IX Междунар. конф. ЛаПлаз-2022: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С.89.
4. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. // Journal of Optical Technology. 2000. V. 67, № 11. P. 961-967.
5. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф. // Вестник ГрГУ. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2015. № 1 (186). С. 113–124.
6. Зноско К.Ф. // Вестник ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. 2019. Т. 9, № 2. С. 81–91.
7. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V. F., Znosko K.F. // Russian Physics Journal. 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.
8. Белаш В.Ч., Зноско К.Ф. // Вестник ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфар., виліч. тэхн. і кір.. 2018. Т. 8, № 3. С. 83–92.

К.Ф. ЗНОСКО, В.Ч. БЕЛАШ
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

ИСТОЧНИКИ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ В СМЕСЯХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С ГАЛОГЕНОНОСИТЕЛЕМ

Представлены результаты разработки и исследования источников УФ излучения. Выполнена оптимизация их эмиссионных характеристик и установлены зависимости эмиссионных свойств от условий их возбуждения, состава рабочей смеси, конфигурации электродов. Показана высокая их эффективность (до 15 %) при возбуждении емкостным и барьерным разрядами.

K.F. ZNOSKO, V.Ch. BELASH
Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

UV RADIATION SOURCES BASED ON GAS-DISCHARGE PLASMA IN MIXTURES OF INERT GASES WITH A HALOGEN CARRIER

The results of development and research of UV radiation sources are presented. Their emission characteristics are optimized and the dependences of emission properties on the conditions of their excitation, composition of the working mixture, and configuration of electrodes are established. Their high efficiency (up to 15%) is shown when excited by capacitive and barrier discharges.

Одним из высокоэффективных источников УФ излучения являются источники на основе газоразрядной плазмы в смесях инертных газов с галогеноносителями [1-2]. Для создания плазмы в таких смесях используются разряды различного типа [1-4]. К настоящему времени разработано большое число конструкций таких источников – от точечных до линейных, планарных, конфирированных [1, 4-6]. Однако, несмотря на достигнутые результаты, задача создания высокоэффективных и технологичных газоразрядных источников излучения до конца не решена.

Исследования проводились с источниками трубчатой конструкции, подобными описанным в [4-7]. Излучатели изготовлены из цилиндрических кварцевых трубок и металлических съемных фланцев. Применение кварцевых трубок различного диаметра и изменение расстояния между кольцевыми электродами позволяет в широком диапазоне изменять объем возбуждаемой активной среды и, соответственно, мощность излучения. Моделирование выходных параметров проводилось по методике [8-9]. Для возбуждения газоразрядных источников излучения разработан программируемый генератор высоковольтных импульсов с микроконтроллерным управлением с использованием полумостового преобразователя с импульсным трансформатором. Для достижения максимальной эффективности преобразования энергии в излучение система возбуждения настраивалась на резонансную частоту.

Проведены экспериментальные исследования амплитудно-временных и спектральных характеристик газоразрядных источников УФ излучения на хлориде ксенона с возбуждением рабочей смеси емкостным и барьерным разрядами. В качестве активной среды использовались смеси газов НС1, Хе и Ne. Использование Ne позволяет значительно повысить мощность выходного излучения, что обусловлено свойствами самого Ne и включением рекомбинационного канала образования $XeCl^*$ молекул. Применение ёмкостного разряда в схеме с кольцевыми электродами позволило получить диффузный разряд в рабочих смесях и высокую эффективность преобразования электрической энергии в излучение. Максимальная средняя мощность излучения газоразрядных источников составляла ~8 Вт. Максимальная эффективность составила ~12 % на смеси НС1:Хе:Ne = 1:30:100 при давлении ~ 0,3 атм. при использовании ёмкостного разряда. Максимальная эффективность источников с использованием барьерного разряда составила ~15 % при возбуждении объеме среды 24 см³. При этом с 1 см³ активной среды снималась мощность излучения ~ 30 мВт/см³. Более 80 % энергии выходного излучения сконцентрировано в полосе В–Х молекулы $XeCl^*$ (длина волны ~308 нм) и около 10 % в полосе D–X (длина волны ~236 нм).

Излучение разработанных источников имеет выраженное биологическое действие на микроорганизмы и вирусы. Оно использовались для дезинфицирующего действия во время пандемии коронавируса SARS-CoV-2.

Список литературы

1. Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н. и др.. // Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения. Томск: СТТ. 2011. 512 с.
2. Erofeev M.V., Tarasenko V.F. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. Vol. 39. P. 3609–3614.
3. Авдеев С.М., Зверева Г.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. С. 33–42.
4. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2015. № 1 (186). С. 113–124.
5. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2018. Т. 8, № 3. С. 102–112.
6. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. 2019. Т. 9, № 2. С. 81–91.
7. Белащ В.Ч., Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат.. фіз.. інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2018. Т. 8, № 3. С. 83–92.
8. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V. F., Znosko K.F. // Russian Physics Journal. 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.
9. Volodenkov A., Anufrick S., Znosko K. // High Temper. Material Processes. 2017. Vol. 21, No 4. P. 377–390.

М.В. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ, Я.В. ГРУДЦЫН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ ГИБРИДНОЙ (СУБ)ПИКОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ~10 МКМ

Создан экспериментальный прототип гибридной (суб)пикосекундной лазерной системы с длиной волны ~10 мкм базирующийся на фемтосекундном титан-сапфировом лазере, частотном преобразовании его излучения в филаменте в CO₂ газе, генерации разностных частот в нелинейном кристалле HgGa₂S₄, а также последующем усиливании в газовом CO₂-лазером усилителе.

M.V. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY, A.V. KORIBUT, YA.V. GRUDTSYN, YU.M. KLIMACHEV
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

AN EXPERIMENTAL PROTOTYPE OF A HYBRID (SUB)PICOSECOND LASER SYSTEM WITH A WAVELENGTH OF 10 MICRON

An experimental prototype of a hybrid (sub)picosecond laser system with a wavelength of 10 μm has been created. This system is based on a femtosecond titanium-sapphire laser, the conversion of its radiation frequency in a filament in CO₂ gas and difference frequency generation in the nonlinear HgGa₂S₄ crystal, as well as an amplification in the CO₂ laser power amplifier.

Фемтосекундные лазерные источники, действующие в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне, являются привлекательным инструментом для множества применений, включая ускорение частиц и генерация высоких гармоник [1]. С целью создания мощной лазерной системы, излучающей ультракороткие импульсы с длиной волны

~10 мкм, в Лаборатории газовых лазеров ФИАН разрабатывается и исследуется лазерная система, базирующаяся на фемтосекундном титан-сапфировом лазере и преобразовании его частоты излучения методами нелинейной оптики, а также усиливании таких импульсов в газовом CO₂-лазером усилителе.

Реализована новая простая эффективная схема генерации разностной частоты в нелинейном кристалле с накачкой импульсами фемтосекундного лазера с длиной волны ~1 мкм. Особенностью этой схемы является новый подход к формированию сигнальной волны, основанный на эффекте уширения спектра фемтосекундных лазерных импульсов при филаментации в газе. Из ряда исследованных газов (азот, аммиак, гелий, двуокись углерода и окись углерода) наиболее подходящим оказался углекислый газ при давлении 1 атм. С использованием кристалла HgGa₂S₄ в этой схеме осуществлена генерация 0.25 пс лазерных импульсов (частота следования импульсов 10 Гц) с возможностью плавной перестройки длины волны в районе 10 мкм. Энергия лазерных импульсов с длиной волны 10 мкм достигала 15 мДж, квантовая эффективность преобразования ~16%.

В эту лазерную систему включен и синхронизован CO₂-лазерный усилитель на основе электроразрядного модуля с УФ предъионизацией ЭЛИ-94, который изначально был построен как эксимерный лазер. Протестирована работа модуля в качестве CO₂-лазера: энергия одиночных импульсов длительностью несколько микросекунд достигала 120 мДж, при частоте повторения импульсов 10 Гц – 30 мДж. Отметим, что в этих экспериментах лазерный модуль работал на газовой смеси CO₂:N₂:He = 1:1:8 с общим давлением 0.5 атм, однако модуль предусматривает возможность повышения давления до 4 атм. CO₂-лазерная генерация на похожем модуле ЭЛИ-91 была реализована нами при давлении ~1.5 атм [2].

Реализовано усиление субпикосекундных импульсов в CO₂-лазерном модуле в двухпроходной V-образной схеме. Усиление сигнала (энергии) лазерных импульсов достигало 50% (по сравнению с выключенным усилителем). Небольшое усиление в этих экспериментах может быть связано с недостаточно высоким давлением активной среды CO₂-усилителя, что приводит к рассогласованию спектра усиления со спектром лазерного импульса. Также в экспериментах наблюдалось долгоживущая (~1 мс) неоднородность в активной среде CO₂-лазерного усилителя, которая, по-видимому, связана с возникновением тепловой линзы или акустической волны, что также могло негативно влиять на процесс усиления.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-79-10068

Список литературы

1. Zgadzaj, R., Welch, J., Cao, Y. and others // Nature Communications. 2024. Vol. 15, № 1. P. 4037.
2. Ионин А.А, Киняевский И.О., Климачев Ю.М. и др. // X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2024»: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ. 2024. С. 35.

Я.В. ГРУДЦЫН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ
 Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

МНОГОЧАСТОТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО УФ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Осуществлена безрезонаторная генерация когерентного излучения, возникающего в CO₂ при давлениях газа до 4.5 бар и инициации филамента фемтосекундными ИК импульсами в широком спектральном диапазоне (от 325 до 470 нм).

Ya.V. GRUDTSIN, Yu.M. KLIMACHEV, I.O. KINYAEVSKY, A.V. KORIBUT

MULTI-FREQUENCY GENERATION OF COHERENT UV RADIATION IN CARBON DIOXIDE BY FILAMENTATION OF FEMTOSECOND LASER PULSES

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Resonatorless generation of coherent radiation arising in CO₂ at gas pressures up to 4.5 bar and initiation of filament by femtosecond IR pulses in a wide spectral range (from 325 to 470 nm) was implemented.

В эксперименте использовался титан-сапфировый лазер Старт 480М (Авеста проект): энергия импульса до 10 мДж, длительность импульса 100 фс, центральная длина волны 950 нм, частота следования импульсов 10 Гц. Энергия лазерного импульса варьировалась дифракционным ослабителем. Для организации филамента излучение накачки фокусировалось сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 2 м в ячейку длиной 1.46 м, заполненную CO₂. Давление в ячейке варьировалось от 0.3 до 4.5 бар. В качестве входного и выходного окон ячейки использовались плоскопараллельные пластины из УФ кварца толщиной ~1 мм. Далее излучение через УФ фильтр направлялось в спектрометр ASP-150 (Авеста проект), а отраженное от фильтра излучение - в спектрометр ASP-960 (Авеста проект). Это позволяло одновременно измерять как спектры излучения в диапазоне 800-1120 нм, так и в диапазоне 270-500 нм. При филаментации в газах спектр излучения накачки уширяется за счет фазовой самодуляции, а также возникает излучение нечетных гармоник. В нашем эксперименте вместо ожидаемого спектра, соответствующего суперпозиции эффектов третьей гармоники и фазовой самодуляции, наблюдались узкие пики на длинах волн 325, 337, 352 нм. При этом излучение третьей гармоники практически не наблюдалось. С увеличением давления и/или энергии накачки в наблюдаемом излучении начинали преобладать более длинноволновые компоненты, и происходило уширение узких линий и их слияние в широкие полосы генерации.

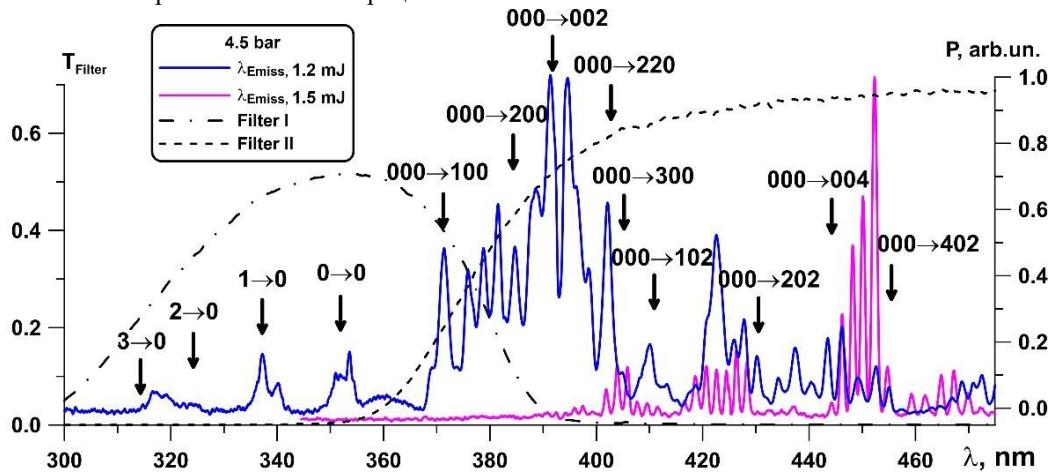


Рис.1. Излучение, возникающее между электронно возбужденными состояниями A²P_u и X²P_g ионов CO₂, генерируемое в филаменте фемтосекундного импульса, и пропускание использованных УФ фильтров.

Спектры сгенерированного УФ излучения, а также пропускание фильтров, представлены на Рис. 1. Кроме этого на Рис. 1 стрелками отмечены пики, соответствующие переходам между колебательными полосами электронно возбужденных состояний A²P_u и X²P_g ионов CO₂⁺, которые удалось идентифицировать с литературных данных. По сравнению с работами [1, 2] нам удалось получить генерацию с более богатым спектром и в более широком спектральном диапазоне (до ~470 нм). Однако идентификация переходов в этом диапазоне существенно затруднена не только из-за перекрытия колебательных полос (у молекулы CO₂ три колебательных моды), но и из-за наличия расщепления уровней благодаря эффекту Реннера-Теллера.

Список литературы

1. Chu W., Zeng B., Yao J. et al. // Europhysics Letters, 2012, v.97, p.64004.
2. Xu H. et al. In Book: Progress in Ultrafast Intense Laser Science, Volume X, Springer International Publishing. 2014. p.95.

А.Н.КОЗЛОВ, И.В.СОЗАЕВ, Д.И.ЦЕЛИКОВ, Г.В. ТИХОНОВСКИЙ, А.А. ПОПОВ, С.М.КЛИМЕНТОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЛАЗЕРНО-АБЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦА ОСНОВЕ ТАНТАЛА ДЛЯ БИНАРНЫХ БИОМЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Выполнен сравнительный анализ фототермических свойств наночастиц тантала, нитрида титана и золота, синтезированных методом фемтосекундной импульсной лазерной абляции в жидкостях в идентичных условиях лазерного воздействия. Фототермические характеристики коллоидного раствора tantalовых наночастиц, продемонстрированные в экспериментах, позволяют отнести данный наноматериал к числу перспективных и конкурентоспособных в ряду аналогичных материалов для биомедицинских технологий, в том числе для бинарной терапии онкологических заболеваний.

A.N.KOZLOV, I.V.SOZAEV, D.I.TSELIKOV, G.V. TIKHONOWSKI, A.A. POPOV, S.M. KLIMENTOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

LASER-ABLATIVE SYNTHESIS OF TANTALUM-BASED NANOPARTICLES FOR BINARY BIOMEDICAL TECHNOLOGIES

A comparative analysis of the photothermal properties of tantalum, titanium nitride and gold nanoparticles synthesized by the method of femtosecond pulsed laser ablation in liquids under identical laser conditions was performed. The photothermal characteristics of a colloidal solution of tantalum nanoparticles, demonstrated in experiments, allow us to classify this nanomaterial as promising and competitive among similar materials for biomedical technologies, including for binary therapy of oncological diseases.

Существенным недостатком наночастиц (НЧ), активно исследовавшихся в качестве потенциальных кандидатов для применения в бинарных биомедицинских технологиях, является наличие только одной физической модальности, к их числу относятся НЧ золота (Au) и нитрида титана (TiN). Их модальности обусловлены сильно выраженным фототермическим свойствами при облучении в окне прозрачности биологических тканей (ОПБТ), в случае TiN [1], и хорошими рентгеноконтрастными характеристиками Au, в силу большого значения атомного номера ($Z = 79$)[2]. В отличие от этих двух материалов, у одноэлементных НЧ тантала (Ta) хорошо выражены обе указанные модальности, благодаря сочетанию высокой удельной проводимости и большого атомного номера ($Z = 73$)[3].

Все три рассматриваемых материала могут быть получены методом фемтосекундной импульсной лазерной абляции в жидкости (фс ИЛАЖ). Перспективность данного метода синтеза НЧ для биомедицинских применений связана с чрезвычайно высокой чистотой получаемых коллоидных растворов и универсальностью. Этим методом, после надлежащей отработки, могут быть синтезированы НЧ чрезвычайно широкого круга простых и многоэлементных материалов, а также их комбинаций[4].

В работе проведен сравнительный анализ фототермических свойств НЧ одноэлементного Ta, Au и высокочистого TiN, синтезированных методом фс ИЛАЖ в оптимальных для каждого материала жидких средах, обеспечивающих хорошие фототермические характеристики получаемых растворов, при одинаковых параметрах лазерного излучения. Полученные таким образом коллоидные растворы НЧ разных концентраций подвергались облучению непрерывным лазером с выходной мощностью 1 Вт и длиной волны 808 нм в пределах одинаковых временных интервалов для получения сравнимых данных по кинетике фотонагрева в зависимости от концентрации НЧ, а также по их фотостабильности.

Сопоставление полученных данных показало, что НЧ Ta по фототермическим свойствам мало уступают НЧ TiN, уже успевшим зарекомендовать себя в качестве материала с выдающимися фототермическими свойствами в ОПБТ [1], и существенно превосходят по этим параметрам НЧ Au. При этом, размерные распределения и морфология НЧ всех трёх исследуемых материалов имеют близкие параметры, что исключает влияние отличий в размере и форме НЧ на объективность сопоставления их способности к конверсии излучения в тепло.

Из результатов произведённого анализа следует, что все три рассмотренные типы НЧ имеют одинаково хорошую фотостабильность, что объясняется их высокой термической и фотохимической стабильностью в условиях нагрева лазером указанной мощности. Нагрев до температур, запускающих процесс апоптоза раковых клеток с использованием НЧ TiN и Ta, достигается одинаково быстро и значительно лучше оптимизирован по спектру поглощения лазерного излучения по сравнению с Au, что позволяет реализовать высокий температурный контраст здоровых и импрегнированных НЧ тканей, что в свою очередь позволяет уменьшить риск термического поражения здоровых клеток, окружающих опухоль, при осуществлении локального гипертермического воздействия. При этом, мультиадресные свойства Ta позволяют осуществлять рентгеновскую визуализацию опухоли, содержащей НЧ, а также оценить необходимую для терапии дозу оптического излучения.

Список литературы

1. Popov A.A., Tikhonowski GV., Shakhov P.V and others// Nanomat. 2022. Vol. 12, № 10. P. 1672–1686.
2. Bergs J.W.J, Macker M.G., Hehlans S. and others// Biochim. et Biophys. Acta. 2015. Vol. 1856. P. 130 – 143.
3. Ji C., Zhao M., Wang C. and others// ACS Nano. 2022. Vol. 16. P. 9428 – 9441.
4. YangG.W// Prog. In Mat. Sci. 2007.Vol. 52. P. 648 – 698.

КОЛЕСНИКОВ Н.М., ГУБСКИЙ К.Л., ЛУКЬЯНОВ К.С., ТИЩЕНКО И.Ю.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ КОАКСИАЛЬНОГО АИПД МЕТОДАМИ ГЕТЕРОДИННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Измерена электронная плотность импульсной плазмы на коаксиальном абляционном импульсном ракетном двигателе (АИПД) методами гетеродинной интерферометрии. Исследована возможность минимизации влияния акустических составляющих внешних шумов использованием источников зондирующего излучения на двух различных длинах волн. Проведена оценка точности параметров плазмы, получаемых с использованием волоконного гетеродинного интерферометра.

N.M. KOLESNIKOV, K.L. GUBSKIY, K.S. LUKIANOV, I.Y. TISHENKO

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

PROPERTIES OF PULSED PLASMA RESEARCH ON A COAXIAL μ PPT BY METHODS OF HETERODYNE INTERFEROMETRY

Researches of the electron density of plasma on a compact ablative pulsed plasma thruster (μ PPT) of a coaxial design were carried out using heterodyne interferometric methods. The possibility of reducing the effect of noise by using two different wavelengths of probing radiation is considered. The accuracy of the values obtained using a fiber heterodyne interferometer has been assessed.

В настоящее время ведутся разработки по созданию электрореактивных ракетных двигателей с большой тягой [1][2]. К ним относятся плазменные ракетные двигатели, вырабатывающие реактивную силу с помощью генерируемого плазменного потока со скоростями до 100 км/с [1]. До установки плазменных ракетных двигателей на космические корабли, имеется необходимость измерения их основного параметра – тяги, для дальнейшей разработки устройств контроля двигателя. Для получения значений силовых характеристик (тяги) приходится использовать методы косвенных измерений [3], а именно измерения основного параметра плазмы – электронной плотности, и скорости истечения плазмы из сопла двигателя.

Внесение каких-либо измерительных приборов или зондов в долгоживущую высокотемпературную плазму не представляется возможным, поэтому для измерения используются дистанционные оптические методы. В настоящем исследовании для измерения электронной плотности плазмы использовались интерферометрические методы, в силу их надежности, однозначности восстановления плотности плазмы из получаемого фазового сдвига, а также высокого пространственного разрешения [4].

Измерения электронной плотности плазмы проведены на коаксиальном абляционном импульсном плазменном двигателе (АИПД). В рамках работы была использована схема двухцветного гетеродинного интерферометра для измерения концентрации свободных электронов в испускаемом двигателем потоке плазмы, а также скорости этого потока. Использование излучения на двух различных длинах волн обусловлена необходимостью устранения влияния акустических помех и электромагнитных наводок на зондирующее излучение. Проведены исследования процессов, наблюдаемых при распространении излучения на различных длинах волн в одном оптическом волокне.

Из экспериментальных данных сделан вывод о высокой помехозащищенности разработанного интерферометра.

Точность фазовых измерений составила 0.03 rad, что соответствует погрешности измерения концентрации свободных электронов $\pm 1 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$. Максимальная концентрация электронов составила $5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$.

Список литературы

1. Katz I. Fundamentals of electric propulsion: ion and hall thrusters. – Wiley, 2008.
2. Florenz R.E. THE X3 100-KW CLASS NESTED-CHANNEL HALL THRUSTER: MOTIVATION, IMPLEMENTATION AND INITIAL PERFORMANCE.
3. Trottenberg A. S., Kersten H. Interferometric Force Probes for Thruster Plume Diagnostics and Indirect Thrust Measurements //35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, USA (2017). – 2017.
4. Кузнецов А.П. Лазерная интерферометрия в диагностике импульсной плазмы: Дис. док. ф.-м. наук: 01.04.21, 01.04.08 // Кузнецов Андрей Петрович; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». - М., 2012, стр. 10

А.В. КОЛЧИН, С.А. КОЗЮХИН

Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

ФЕМТОСЕКУНДНОЕ ЛАЗЕРНОЕ АНИЗОТРОПНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

С помощью комбинации теоретических и экспериментальных методик проведено изучение анизотропного структурирования халькогенидных тонких пленок под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Описаны особенности индуцированных изменений фазового состава и морфологии поверхности.

A.V. KOLCHIN, S.A. KOZYUKHIN

Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow, Russia

FEMTOSECOND LASER ANISOTROPIC STRUCTURING OF AMORPHOUS $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ THIN FILMS

Anisotropic structuring of chalcogenide thin films under femtosecond laser treatment was investigated by combination of theoretical and experimental methods. The features of phase and surface transitions were described.

Фемтосекундное лазерное структурирование тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225) является перспективным методом формирования устройств реконфигурируемой нанофотоники [1]. Это обусловлено тем, что обратимые фазовые переходы сопровождаются образованием лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИПС) [2].

Образцы аморфных тонких пленок GST225 с толщиной 130–200 нм на диэлектрических подложках $\text{SiO}_2/\text{c-Si}$ были сформированы с помощью магнетронного осаждения поликристаллических мишеней. Последующее воздействие фемтосекундными лазерными импульсами (длина волны 1250 нм, длительность 135 фс, частота следования 10 Гц, плотность энергии 0.1–0.2 Дж/см²) было осуществлено в сканирующем режиме. Комплексное изучение фазового состава и морфологии поверхности исходных и облученных пленок было проведено через сочетание таких экспериментальных методик, как оптическая (ОМ), атомно-силовая (АСМ) и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), рентгеновская дифракция, спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) и инфракрасной (ИК) спектроскопии. В то же время теоретическое описание производилось путем численных расчетов в рамках двухтемпературной модели [2] и теории Сайпа-Бонзе-Друде [3].

Обнаружено, что формирование поверхностных решеток с периодом, близким к длине волн структурирующего лазерного излучения, сопровождается кристаллизацией изначально аморфного GST225. Причем как показывают теоретические расчеты, речь идет о возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов в течение генерации фотондуцированных свободных носителей заряда. В то же время образование структур с субволновым периодом сопровождается реаморфизацией закристаллизованных областей. Численное моделирование демонстрирует, что это обусловлено плавлением материала с последующим сверхбыстрым охлаждением.

Таким образом, необходимо говорить о связности модификации поверхности и реверсивных фазовых переходов в результате фемтосекундного лазерного облучения тонких пленок GST225.

Список литературы

1. E. Menshikov et al // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2024. Vol. 17. P. 38345–38354.
2. J.K. Chen et al. // Int. J. Heat. Mass. Transfer. 2006. V. 49. P. 307–316.
3. J. Bonse et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. N. 104910.

П.С. КУЛЕШОВ^{1,2}

¹ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия

²МФТИ, Долгопрудный, Россия

ДВУХСТАДИЙНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ

Изучается лазерная фрагментация металлических и керамических мишеней в жидкости. Первая стадия (абляция) происходит при воздействии лазерных импульсов на поверхность мишени с образованием субмикронных частиц, а вторая стадия (фрагментация) - при воздействии лазерных импульсов на субмикронные частицы с образованием мелких наночастиц.

P.S. KULESHOV^{1,2}

¹CIAM named after P.I. Baranov, Moscow, Russia

²MIPT, Dolgoprudny, Russia

TWO-STAGE LASER FRAGMENTATION

Laser fragmentation in liquid of metal and ceramic targets is studied. The first stage (ablation) occurs when laser pulses are exposed to the target surface with the formation of submicron particles, and the second stage (fragmentation) occurs when laser pulses are exposed to submicron particles with the formation of small nanoparticles.

Абляция металлических и керамических мишеней под действием лазерного излучения в жидкостях и газах является одним из методов получения субмикронных частиц [1-6]. К недостаткам лазерной абляции можно отнести широкое распределение по размерам полученных частиц. Для улучшения метода используют вторичное лазерное облучение коллоидных растворов частиц уже в отсутствие мишени [1,3-6], что приводит в процессе лазерной фрагментации к смещению максимума распределения в область меньших размеров и его сужению.

К настоящему моменту определены параметры излучения, влияющие на распределение частиц по размерам, такие как: длина волны, число воздействующих импульсов, плотность энергии, длительность импульса и т.д. [2,7,8]. Однако, возможности по предсказанию размеров частиц и их распределений на основе теплофизических данных о мишенях и параметрах воздействующего лазерного излучения все еще не удовлетворительны.

Цель данной работы аналитически объяснить отдельные аспекты двухстадийной лазерной фрагментации (последовательных стадий абляции и фрагментации) на основе экспериментов [3-6], и дать простую аналитическую формулу расчета размеров фрагментов частиц на основе капиллярно-волнового механизма [7, 8].

Помимо изучения распределения мелких наночастиц, полученных лазерной фрагментацией исходных субмикронных частиц, в данной работе, в отличие от [8], выводится исходное распределение субмикронных частиц, наработанных в процессе лазерной абляцией крупной мишени. Кроме того, в рамках первой стадии (лазерной абляции) рассматриваются не только процессы образования субмикронных капель расплава мишеней, но и процессы разрушения мишеней в твердой фазе под действием ударного импульса.

Расчеты подтвердили, что в [3] первая стадия генерации крупных частиц Al₂O₃ с поверхности толстостенной мишени из корундовой керамики происходит в твердой фазе в нерезонансном процессе, а вторая стадия генерации мелких частиц - при диспергации расплавленной крупной частицы в резонансном процессе. Расчетные средние размеры как крупных, так и мелких частиц занижены по сравнению с экспериментом в 2-3 раза, теоретическая оценка дисперсии мелких частиц 30-40% не противоречит экспериментально наблюдаемой дисперсии 25-80%, а экспериментальное значение дисперсии крупных частиц ~60% имеет признаки предсказанного случайного процесса. Показано, что в [4] первая стадия генерации крупных частиц Ti и Au при сканировании лазерным лучом по тонким металлическим пленкам на подложках из стекла (без перекрытия лазерных пятен) может происходить при переходе в жидкую фазу металла в резонансном процессе. Вторая стадия генерации мелких частиц также происходит в резонансном процессе при диспергации жидкой фазы расплава из материала крупной частицы. Предсказанный средний размер частиц мелкой фракции занижен по сравнению с экспериментом в 4-7 раз (в отличие от крупной фракции, для которой наблюдается хорошее совпадение с экспериментом). Даны объяснения наблюдаемым более

узким распределениям крупных и мелких частиц, нежели предсказанные в рамках развивающегося подхода [7,8].

В отличие от экспериментов [3, 4] в работах [5, 6] описывается диспергация с толстых пленок Au, Ag (первая стадия) при большом числе перекрытий лазерных импульсов. Расчет дает хорошее совпадение с экспериментами, как по медианам, так и по дисперсиям частиц. Для второй стадии фрагментации в экспериментах [5, 6] расчет дает сильно заниженные значения по медианам распределений, что может быть связано с не учетом процесса коагуляции.

Список литературы

1. Zhang, D., Gökce, B. & Barcikowski, S. Chem. Rev. 117, 3990–4103 (2017).
2. Nastulyavichus, A. A. et al. Opt. Laser Technol. 111, 75–80 (2019).
3. M. O. Paskhin, K. O. Aiyyzhy, R. V. Pobedonostsev, et. all Ruby Nanoparticles for Greenhouse Farming: Synthesis, Features and Application // J. Compos. Sci. 2024, 8, 7. <https://doi.org/10.3390/jcs8010007>
4. Жигарьков В.С., Ивановская Е.В., Айызы К.О., Овчаров А.В. Получение частиц на основе титана и золота методом лазерной абляции тонких пленок в жидкости // Письма в ЖТФ, 2023, том 49, вып. 22, с. 31-34
5. Бозон-Вердюра Ф., Брайнер Р., Воронов В.В., и д.р. Кvantовая электроника, 33, 714 (2003).
6. Кириченко Н.А., Сухов И.А., Шафеев Г.А., Щербина М.Е. Кvantовая электроника, 42, 175 (2012).
7. Кулешов П.С., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В. Механизмы формирования поверхностного нанорельефа при лазерной абляции // ТВТ, 2024, том 62, вып. 1, с. 112-120. <https://www.mathnet.ru/rus/tvt11933>.
8. Айызы К.О., Бармина Е.В., Кулешов П.С., Шафеев Г.А. Эволюция отдельных фракций в распределениях металлических наночастиц при их лазерной фрагментации // Кvantовая Электроника, 2024, том 54, вып. 12 (в печати).

А. С. АБРАМОВ, В. А. ЛАПИН, П. П. МИРОНОВ

Ульяновский государственный университет Научно-технологический институт им. С.П. Капицы, Ульяновск, Россия

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ С СЛАБОЙ АМПЛИТУДНОЙ И СИЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В ПРОДОЛЬНО НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ

Исследовалась динамика излучения с сильной фазовой модуляцией в волоконном световоде с убывающим по модулю экспоненциальным профилем дисперсии групповых скоростей от длины. Показано, что параметры фазовой модуляции сильно влияют на пиковую мощность генерируемых импульсов.

A. S. ABRAMOV, V. A. LAPIN, P. P. MIRONOV

Ulyanovsk State University, S.P. Kapitsa Research Institute of Technology, Ulyanovsk, Russia

PROPAGATION OF A WAVE WITH WEAK AMPLITUDE AND STRONG PHASE MODULATION IN A LONGITUDINALLY INHOMOGENEOUS OPTICAL FIBER

The dynamics of radiation with strong phase modulation in a fiber fiber with a decreasing modulus exponential profile of the dispersion of group velocities from length was studied. It is shown that the parameters of phase modulation strongly influence the peak power of the generated pulses.

В условиях самосинхронизированного взаимодействия ЭМ волны, распространяющейся вдоль поверхности цилиндра-модулятора с ВПЗ, реализуется глубокая фазовая модуляция введенного излучения. В этом случае, соотношение выражение для амплитуды излучения на выходе из световода-модулятора:

$$A_s(z = l, t) \approx \sqrt{P_n} [1 + \delta_a \cos(\Omega_a t)] \exp[-i\delta \cos(\Omega_l t)] \quad (1)$$

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = 0 \quad (2)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2 \beta / d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей,

R – параметр нелинейности. При этом в работе выбиралась зависимость дисперсии вида:

$$d_2(z) = -|d_{20}| \exp[-bz] \quad (3)$$

На рис. 1 приводятся результаты численного моделирования распространения модулированной волны путем численного решения уравнения (2) SSFM[1]. При этом для моделирования в работе были выбраны параметры: мощность модулированной волны $P_n = 1$ Вт, начальное значение дисперсии световода $d_{20} = -10^{-26}$ с²/м, параметра неоднородности ДГС $b = \frac{1}{2L} \ln(10) = \frac{1}{1000} \ln(10) \approx 2.31 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹, параметр керровской нелинейности $R = 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹, $\delta_a = 0.01$ и $\Omega_a = \sqrt{2RP_n / |d_{20}|}$ – глубина и частота амплитудной модуляции, $\delta = 1$ $\Omega_p = (0.6; 3; 6) \cdot 10^{12}$ с⁻¹ – кривые (1–3)(a) и $\Omega_p = 0.6 \cdot 10^{12}$ с⁻¹ $\delta = 1; 3; 5$ – кривые (1–3)(b).

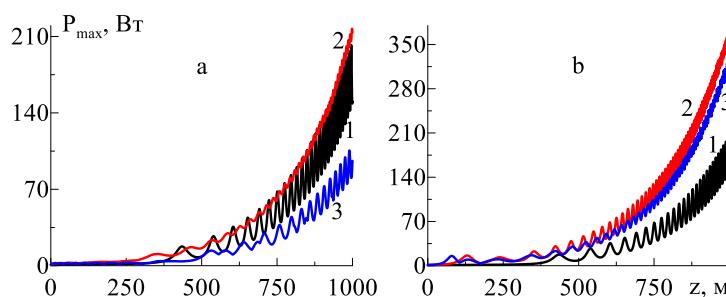


Рис. 1. Зависимости пиковой мощности при значениях $\delta = 1$ $\Omega_p = (0.6; 3; 6) \cdot 10^{12}$ с⁻¹ – кривые (1–3)(a) и $\delta = 1; 3; 5$ – кривые (1–3)(b)
 $\Omega_p = 0.6 \cdot 10^{12}$ с⁻¹.

Видно, что с увеличением амплитуды или частоты фазовой модуляции значительно растет пиковая мощность генерируемых последовательностей импульсов, при этом этот рост быстро со временем сменяется убылью, что показывает возможность подбора оптимальных для использования данного эффекта для генерации последовательностей ультракоротких импульсов параметров.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках государственного задания FEUF-2023-0003 и проекта РНФ № 23-79-30017.

Список литературы

1. I. O. Zolotovskii, V. A. Lapin, D. I. Sementsov, A. A. Fotiadi, S. V. Popov // Optics Communications. – 2018. – V. 426. – P. 333–340.
2. Abramov A.S., Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Mironov P.P., Yavtushenko M.S., Svetukhin V. V., Fotiadi A.A. Photonics 9 (3), 160 (2022).

А.А. ЛИСКОВИЧ

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ФАКЕЛОВ АЛЮМИНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Представлены результаты исследования влияния взаимодействия эрозионных плазменных факелов, образованных на мишени из алюминия, на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. Показано, что при разнесении зон воздействия первого и второго лазерного импульса на мишени интенсивность спектральных линий плазмы падает.

A.A. LISKOVICH

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

INFLUENCE OF INTERACTION OF EROSION PLASMA TORCHES OF ALUMINUM ON THE INTENSITY OF THEIR SPECTRAL LINES

The results of the study of the influence of the interaction of erosive plasma torches formed on an aluminum target on the intensity of the spectral lines of laser-emission plasma are presented. It is shown that when the zones of action of the first and second laser pulses on the target are separated, the intensity of the spectral lines of the plasma decreases.

Использование для обработки материалов сдвоенных лазерных импульсов приводит к росту эффективности процесса [1-2], увеличению массы ablированного вещества [3-4], росту интенсивности свечения эрозионных плазменных факелов [5-6]. В работах [1, 3, 7] показано, что основной причиной, приводящей к росту выноса материала из эрозионного кратера и росту интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ablации вещества сдвоенными лазерными импульсами, является высокая температура кратера, обусловленная действием первого лазерного импульса. Взаимодействие второго лазерного импульса с «горячей поверхностью» приводит к росту эффективности взаимодействия излучения с веществом и существенному росту выноса материала из эрозионного кратера. Чем меньше задержка второго лазерного импульса относительно первого, тем выше температура эрозионного кратера и тем эффективнее происходит взаимодействие лазерного излучения с его поверхностью.

При воздействии на вещество сдвоенными лазерными импульсами первый плазменный факел отбрасывает воздух от эрозионного кратера, а второй – распространяется вовнутрь первого. Происходит взаимодействие

«горячего» плазменного факела с остывающей плазмой первого плазменного факела. Некоторая часть энергии, аккумулированной в плазме второго факела, передается веществу первого факела. Происходит быстрое охлаждение вещества второго плазменного факела, фрагментация и возбуждение сконденсированного в кластеры и наноструктуры вещества первого плазменного факела. Это приводит к снижению температуры плазмы и интенсивности сплошного фонового излучения плазмы, росту интенсивности селективного излучения атомов и ионов вещества мишени.

Исследование закономерностей взаимодействия плазменных факелов, образованных сдвоенными лазерными импульсами, является актуальным для LIBS спектроскопии. Влияние взаимодействия эрозионных плазменных факелов на интенсивность их спектральных линий исследовалось на мишени из алюминия на установке подобной [3, 8, 9]. Для исключения влияния температуры эрозионного кратера на интенсивность спектральных линий плазмы необходимо, чтобы кратеры, образованные первым и вторым импульсами на мишени, были расположены на некотором расстоянии друг от друга. При этом плазменные факелы должны перекрываться друг с другом.

Исследования показали, что при разнесении зон воздействия лазерного излучения на 0,5 мм интенсивность спектральных линий плазмы резко падает. При дальнейшем увеличении расстояния между эрозионными кратерами интенсивность линий ионов алюминия уменьшается плавно. Интенсивность атомных линий при расстояниях до 2 мм уменьшаются слабо, а больших – более существенно. При расстояниях между кратерами в 6 мм интенсивность спектральных линий плазмы практически перестает уменьшаться. Плазменные факелы при этом не перекрываются и не взаимодействуют, и ведут себя как независимые. Указанные закономерности проявляются при значениях межимпульсного интервала 1-10 мкс. При больших значениях межимпульсного интервала взаимодействие эрозионных плазменных факелов на интенсивность их спектральных линий существенного влияния не оказывает.

Список литературы

1. Першин С.М. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 1. С. 63–67.
2. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 3. С. 100-113.
3. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2023. Т. 13, № 1. С. 116-132.
4. Зноско К.Ф., Лещик С.Д. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. 2021. Т. 11, № 1. С. 45-58.
5. Tognoni E., Cristoforetti G. // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2014. Vol. 29, No. 8. P. 1318–1338.
6. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 2. С.103-115.
7. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2021. Т. 11, № 1. С. 94-106.
8. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И. и др. // Журнал прикладн. спектроскоп.. 2016. Т. 83, № 5. С. 724–730.
9. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.В. // Журнал прикладн. спектроскоп.. 2018. Т. 85, №2. С.285-292.

А.А. ЛИСКОВИЧ

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

УСИЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ МЕТАЛЛОВ В СРЕДЕ ГЕЛИЯ

Приведены результаты исследования влияния газовой среды, окружающей мишень, на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. Показано, что интенсивность спектральных линий алюминия и индия при моноимпульсном лазерном воздействии на мишень, расположенную в среде гелия, наносекундными импульсами возрастает до трех раз.

A.A. LISKOVICH

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

ENHANCEMENT OF THE INTENSITY OF SPECTRAL LINES OF LASER-EMISSION PLASMA OF METALS IN A HELIUM ENVIRONMENT

The results of the study of the effect of the gas medium surrounding the target on the intensity of the spectral lines of laser-emission plasma are presented. It is shown that the intensity of the spectral lines of aluminum and indium increases up to three times with single-pulse laser action on the target located in the helium medium by nanosecond pulses.

Для неразрушающего контроля состава веществ и изделий применяются методы, базирующиеся на использовании рентгеновских лучей, ультразвука, радиоактивного излучения и т.д.. Перспективными и интенсивно развивающимися являются лазерно-эмиссионные спектральные методы (LIBS-спектроскопия) [1-2]. При LIBS анализе на исследуемый объект (мишень) осуществляется воздействие сфокусированным лазерным излучением наносекундной длительности. Диаметр пятна воздействия составляет 0,1-0,3 мм. На мишени образуется эрозионный кратер, а слой вещества толщиной в несколько микрон превращается в лазерно-эмиссионную плазму. Над кратером формируется светящийся плазменный факел, спектр которого характеризуется наличием атомных и ионных эмиссионных линий вещества. Расшифровка этого спектра позволяет установить химический состав вещества мишени [3-4].

Исследование элементного состава LIBS методом происходит в воздушной атмосфере при естественных условиях. Это обусловлено экспрессностью LIBS анализа и функционированием производственных процессов в среде воздушной атмосферы. Однако среда, в которой производится LIBS анализ, оказывает влияние на физические процессы, происходящие при этом. Распространяющаяся в воздушную среду плазма, взаимодействует с ее молекулами, в первую очередь с молекулами кислорода и азота. Это приводит к образованию оксидов и нитридов на периферии плазменного факела, отражается на кинетических процессах, происходящих в плазме, безизлучательной релаксации возбужденных состояний частиц ее составляющих, снижению интенсивности ее спектральных линий.

Для установления влияния газовой среды, окружающей мишень, на интенсивность спектральных линий были проведены сравнительные исследования спектров лазерно-эмиссионной плазмы, образованной на мишениях из алюминия и индия, в среде воздуха и гелия. Исследования проводились на установке, описанной в [5-6]. В ее основе лежал лазерно-эмиссионный спектрометр, разработанный в институте физики НАН Беларусь.

Анализ полученных спектров этих металлов показывает, что при формировании лазерно-эмиссионной плазмы одиночными лазерными импульсами в среде гелия в спектральном диапазоне 258-369 нм интенсивность большинства спектральных линий выросла в 1,5 - 2 раза по сравнению с интенсивностью спектральных линий, полученных в среде воздуха. Интенсивность ряда линий увеличилась в 2,5 - 3 раза. Так, как гелий является инертным газом, то взаимодействуя с лазерно-эмиссионной плазмой он не образует устойчивых соединений, в отличие от атмосферных газов. Рост интенсивности спектральных линий при экспериментах в среде гелия обусловлен отсутствием взаимодействия лазерно-эмиссионной плазмы с атмосферными газами в процессе ее расширения.

При формировании плазмы сдвоенными импульсами в среде гелия интенсивность спектральных линий возрастает значительно слабее. Это связано с тем, что плазменный факел, образованный первым лазерным импульсом, «отбрасывает» воздух от мишени, а плазменный факел, сформированный вторым импульсом, распространяется уже внутрь первого, в область, практически не содержащую воздуха [7]. Этим, исключается взаимодействие второго плазменного факела с воздухом, что и приводит к росту интенсивности ее спектральных линий.

Список литературы

1. Попов А.М., Лабутин Т.А., Зоров Н.Б. // Вестник МГУ. Серия 2. Химия. 2009. Т. 50, № 6. С. 453–467.
2. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курьян Н.Н. // Веснік ГрГУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., вyllіч. тэхн. і кір.. 2015. № 3 (199). С. 83–92.
3. Tognoni E., Cristoforetti G. // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2014. Vol. 29, No. 8. P. 1318–1338.
4. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И. и др. // Журнал прикладн. спектроскоп.. 2016. Т. 83, № 5. С. 724–730.
5. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.В. // Журнал прикладн. спектроскоп.. 2018. Т. 85, №2. С.285-292.
6. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., вyllіч. тэхн. і кір.. 2021. Т. 11, № 1. С. 94-106.
7. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., вyllіч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 2. С.103-115.

Е.И. МЕЗЕНИН, В.А. СТЕПАНОВ

Обнинский институт атомной энергетики (филиал) "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Обнинск,
Россия

ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИК НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ЦИРКОНИЯ И АЛЮМИНИЯ

Плазма на поверхности высокотемпературных керамик на основе оксидов циркония и алюминия инициировалась за счёт антенного эффекта области лазерного облучения. Обнаружено явление протекания электрического тока через газовые разряды между объёмными образцами холодной керамики во внешнем СВЧ-поле. В условиях лазерного-плазменной обработки керамик образуются бездефектные кристаллические структуры.

E.I. MEZENIN, V.A. STEPANOV

Obninsk Institute of Nuclear Energy National Research Nuclear University MEPhI, Russia.

LASER-PLASMA TREATMENT OF HIGH TEMPERATURE CERAMICS BASED ON ZIRCONIUM AND ALUMINUM OXIDES

The plasma was obtained as a result of the antenna effect, which was initiated in the area of laser irradiation of the surface of high temperature ceramics based on zirconium oxide and alumina. The phenomenon of electric current flow through gas discharges between volumes of cold ceramic samples in an external microwave field was discovered. After laser-plasma treatment of ceramics defect-free crystalline structures are formed.

Сочетание лазерного и плазменного воздействия на высокотемпературные керамики может приводить к процессам плавления/криSTALLизации с формированием сплошной бездефектной поверхности керамик [1,2]. Одновременное с лазерным плазменное воздействие приводит к отпуску, возникающих при чисто лазерном воздействии механических напряжений, т.е. приводит к улучшению физико-механических свойств.

Ранее было установлено, что плазма на поверхности высокотемпературных оксидных керамик может быть создана электромагнитным излучением и локализована с помощью составных СВЧ-вибраторов, включающих четверть- и полуволновые антенны. СВЧ плазма может быть инициирована за счёт антенного эффекта области лазерного облучения, когда нагретый диэлектрик является ионным проводником и частью СВЧ-вибратора. В настоящей работе обнаружен эффект проводимости электрического тока холодной диэлектрической керамикой во внешнем СВЧ-поле. Протекание электрического тока в объёме керамических образцов во внешнем СВЧ электромагнитном поле подтверждается конфигурированным поверхностным СВЧ-разрядом и образованием непрерывно горящих разрядов между частями керамики при отсутствии инициаторов таких разрядов непосредственно в области их образования. Предполагается поляронная природа электрической проводимости, инициируемой внешним СВЧ электромагнитным полем.

При лазерно-плазменной обработке оgneупорных материалов уменьшается дефектность получаемых при плавлении-криSTALLизации структур. Это подтверждается микроскопическими исследованиями и с помощью рентгеноструктурного анализа. В условиях лазерного плавления и криSTALLизации кальций-стабилизированного оксида циркония и оксида алюминия образуется керамика с развитой микроструктурой, а при дополнительном воздействии СВЧ плазмы, локализованной в области лазерного облучения, в процессе криSTALLизации образуется относительно гладкая поверхность (рисунок 1). Одновременно с этим уменьшается зона когерентного рассеяния рентгеновского излучения.

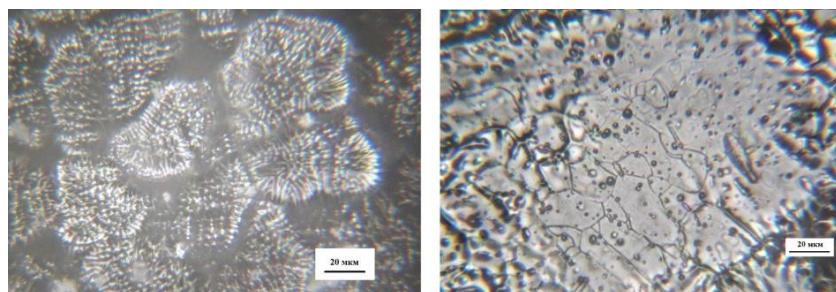


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности керамики из оксида циркония, стабилизированного кальцием: после лазерного плавления (слева), после лазерного плавления в СВЧ плазме (справа)

Список литературы

1. Мезенин Е.И., Степанов В.А. Обработка высокотемпературных керамических материалов инициируемой антенным эффектом СВЧ-плазмой // Международный семинар МНТ-XVII. Тезисы докладов. Обнинск. С. 28. – 2023
2. Мезенин Е.И., Степанов В.А. Индуцируемая лазерным излучением стационарная СВЧ плазма на поверхности высокотемпературных керамик // Российский химический журнал. Т. 68. - № 1. - с. 25-29 – 2024

С.С. ЛЮБИН^{1,2}, М.А. МУРЗАКОВ¹, И.И. РЯШКО¹

¹ООО НТО “ИРЭ-Полюс”, Московская область, г. Фрязино, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СОЗДАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ТРАВЛЕНИЯ

Разработана и успешно применена технология селективного лазерного травления для прецизионной обработки кварцевого стекла толщиной до 2 мм. Технология продемонстрировала эффективность для двух операций: резка, вертикальная и под углом, и прошивка тонких отверстий. Полученные изделия по качеству превосходят изделия, изготовленные традиционным абляционным методом.

S.S. LYUBIN^{1,2}, M.A. MURZAKOV¹, I.I. RYASHKO¹

¹LLC “IRE-Polus”, Moscow reg., Fryazino, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CREATION OF PRECISION PRODUCTS FROM TRANSPARENT DIELECTRICS USING SELECTIVE LASER ETCHING TECHNOLOGY

Selective laser etching technology has been developed and successfully applied for precision processing of quartz glass up to 2 mm thick. The technology has demonstrated efficiency for two operations: cutting, vertical and angled, and piercing thin holes. The resulting products are superior in quality to products made by the traditional ablative technique.

Селективное лазерное травление (СЛТ) – двухэтапный процесс, состоящий из модификации материала лазерным излучением и удаления этого модифицированного материала в ходе травления в агрессивной среде [1]. Этот процесс предлагает уникальные возможности для получения произвольных полых объемов в прозрачных материалах, таких как кристаллы или стекло, путем нанесения локальных дефектов в виде отдельных линий для получения желаемых форм [1,2]. СЛТ позволяет осуществлять прецизионную микрообработку, включая высокоточную микрорезку (фрезеровку) и создание микроотверстий, с высокой точностью, избегая при этом процессы плавления и абляции материала, и обеспечивает, таким образом, уникальное прецизионное качество.

На рисунке 1 продемонстрированы две технологические операции: резка и прошивка тонких отверстий.

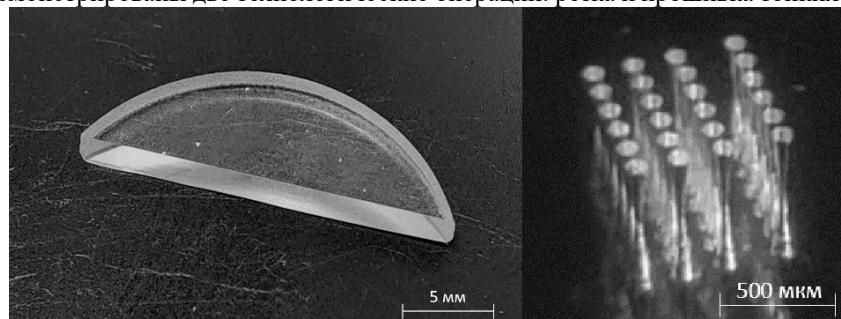


Рис. 1. Пример готового изделия, изготовленного по технологии СЛТ

Проведенные исследования выявили ряд существенных преимуществ технологии СЛТ при обработке кварцевого стекла:

1. Минимальная конусность обработанных поверхностей: до 1° при резке и до 5,4° при перфорации отверстий;

2. Низкая шероховатость боковых граней реза: Ra – 0,2 мкм; Rz – 2,7 мкм;

3. Прозрачность полученных граней, позволяющая обеспечить оптический контакт (например, при лазерной сварке);

4. Малый входной диаметр отверстий:

D = 27 мкм в цериевом стекле толщиной 140 мкм;

D = 140 мкм в кварцевом стекле толщиной 2 мм.

Эти характеристики демонстрируют высокое качество обработки поверхности, что особенно важно для высокоточных применений. Несмотря на то, что исследование проводилось на кварцевом стекле, полученные результаты и разработанная технология открывают широкие перспективы для обработки разнообразных прозрачных материалов. Это существенно расширяет потенциальные области применения СЛТ в различных направлениях.

Список литературы

1. Kim S. et al. Optimization of selective laser-induced etching (SLE) for fabrication of 3D glass microfluidic device with multi-layer micro channels //Micro and Nano Systems Letters. – 2019. – Т. 7. – №. 1. – С. 1-7.
2. Wang B. X. et al. Rapid fabrication of smooth micro-optical components on glass by etching-assisted femtosecond laser modification //Materials. – 2022. – Т. 15. – №. 2. – С. 678.

И.Р. ОВСЯНКИН, Ф.В. ФУНТОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, В.Д. МИРОНОВ, П.С. ДЖУМАЕВ,
В.И. ПОЛЬСКИЙ, Е.С. ЕРМИЛОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ $\text{NiZnAl}_2\text{O}_3$, СОЗДАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРА

В данном исследовании порошок никеля с добавлением порошка цинка и оксида алюминия подвергались холодному напылению под низким давлением с помощью лазера на углеродистую сталь. Покрытия наносились с использованием воздуха в качестве технологического газа. В экспериментах использовался мощный волоконный лазер непрерывного действия мощностью 3,5 кВт и установка для холодного напыления под низким давлением ДИМЕТ-404. Было изучено влияние мощности лазера, режима расхода порошка, режима нагрева сжатого воздуха на микроструктуру и плотность нанесения покрытий. Результаты показали, что лазерное облучение повышает плотность покрытия, а также эффективность напыления.

I.R. OVSYANKIN, F.V. PHUNTOV, V.N. PETROVSKIY,
V.D. MIRONOV, P.S. DZHUMAEV, V.I. POLSKIY, E.S. ERMILLOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF $\text{NiZnAl}_2\text{O}_3$ COATINGS CREATED LOW-PRESSURE COLD SPRAYING TECHNOLOGY USING A LASER

In this study, nickel powder with the addition of zinc powder and aluminum oxide were subjected to cold spraying under low pressure using a laser on carbon steel. The coatings were applied using air as a process gas. The experiments used a powerful continuous- action fiber laser with a power of 3.5 kW and a DIMET-404 low-pressure cold spraying unit. The effect of laser power, powder flow rate mode, and compressed air heating mode on the microstructure and coating density was studied. The results showed that laser irradiation increases the coating density, as well as the spraying efficiency.

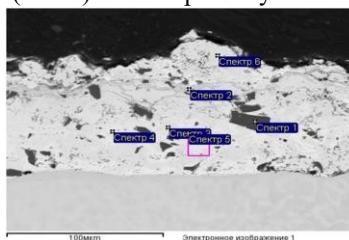
В данной работе представлен гибридный процесс нанесения покрытия - холодное напыление под низким давлением с помощью лазера или (LALPCS). Лазерное излучение взаимодействует одновременно с точечным холодным напылением под низким давлением на подложку для улучшения свойств покрытия.

При термическом напылении с использованием лазера (или лазерном гибридном напылении) целью лазера является увеличение мощности плавления термического пистолета-распылителя и, таким образом, создание гораздо более плотных и адгезионных покрытий по сравнению с обычными покрытиями, наносимыми термическим напылением.

Установлено, что нанесение покрытий холодным напылением с помощью лазера может быть достигнуто при скоростях частиц ниже обычных, требуемых для холодного напыления. В процессе нанесения не происходит существенного расплавления нанесенного материала и практически отсутствует зона термического воздействия на подложку.

В данном исследовании для получения образцов металлокерамических покрытий в качестве исходного материала использовался порошок марки N7-00-14 (никель, цинк, корунд) производства Обнинского центра порошкового напыления, состоящий из частиц технического чистого никеля, цинка и электрокорунда. Назначение данного порошка: заполнение каверн, прогаров, узких и сквозных дефектов в изделиях, работающих при температурах от 800 до 1200 °C. Крупность порошка составляла 5 – 50 мкм. В качестве подложки для нанесения покрытий использовались пластины, изготовленные из малоуглеродистой стали Ст. 3. Размеры образцов составляли 60 × 20 × 3 мм. Напыление покрытий осуществлялось методом холодного газодинамического напыления низкого давления (ХГДН) установкой "ДИМЕТ – 404" с использованием непрерывного лазерного излучения мощностью до 3,5 кВт.

В работе были реализованы две геометрии эксперимента процесса LALPCS. При первой геометрии лазерный луч использовался для одновременного лазерного облучения пятна распыления и локального предварительного нагрева подложки (Рис.1). Во втором случае пятно холодного распыления низкого давления следовало за лазерным лучом.



Спектр	O	Al	Fe	Ni	Zn	Итог
Спектр 1	45.03	53.92	0.00	1.05	0.00	Al_2O_3
Спектр 2	15.97	0.64	0.00	8.11	75.28	оксид цинка
Спектр 3	0.67	0.00	0.00	99.33	0.00	Ni
Спектр 4	0.00	0.00	0.48	66.54	32.97	сплав цинка и никеля
Спектр 5	0.97	0.00	0.31	75.80	22.92	сплав цинка и никеля
Спектр 6	0.49	0.00	0.19	99.32	0.00	Ni

Рисунок 1 - Микрофотография поперечного шлифа напыления и элементный состав покрытия.

Е.А. ОРЛОВА¹, Д.С. САМОХИН¹, А.Е. СОЛОМАТИН²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ Обнинский институт ядерной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ,
г. Обнинск, Россия, ²Институт ядерных исследований ИЯИ РАН г. Троицк, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ LAES ЗАЛЕЧИВАНИЯ В СВИНЦЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА СТАЛИ 16Х12ВМСФБР

Методом LAES показано перераспределение основных элементов (Fe, Cr, Si) стали 16Х12ВМСФБР по глубине поперечного сечения образца в области искусственно созданного дефекта после экспозиции в свинце при 630 °C в течение 15 ч.

E.A. ORLOVA¹, D.S. SAMOKHIN¹, A.E. SOLOMATIN²

¹National research nuclear university "MEPhI" (NRNU MEPhI) Obninsk institute of nuclear energy (IATE), Obninsk, Russia, ²Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences (INR RAS), Troitsk, Russia

INVESTIGATION BY METHOD OF LAES OF HEALING IN LEAD OF MECHANICAL DAMAGE OF PROTECTIVE COATING ON STEEL 16Cr12WMoSiVNbB

The method LAES shows the overdistribution of the main elements (Fe, Cr, Si) of steel 16Cr12WMoSiVNbB along the depth of the cross section of the sample in the region of an artificially created defect after exposure in lead at 630 °C for 15 hours.

На рисунке 1 представлены результаты исследования методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии (LAES) участков образца стали 16Х12ВМСФБР с механическими повреждениями защитного покрытия, сформированного в свинце с единичной активностью кислорода при 923 К в течение 15 ч. и последующей выдержки с нанесенным искусственным дефектом при 900 К в течение 15 ч. Метод послойного анализа в двухимпульсном режиме работы лазера с энергией накачки 10 Дж с глубиной кратера (слоя, n) испаряемого материала за один выстрел около 0,2 мкм позволил исследовать перераспределение компонентов стали характерное для начального периода испытаний. В дефекте обнаружены меньший слой и концентрация поверхностного железа, повышенное содержание хрома, повышенное содержание кремния вблизи поверхности стали и уменьшенное в глубине по сравнению с прилегающими областями, т.е. показано, что в начальный период взаимодействия стали со свинцом образуется защитное покрытие с сегрегацией кремния к поверхности стали.

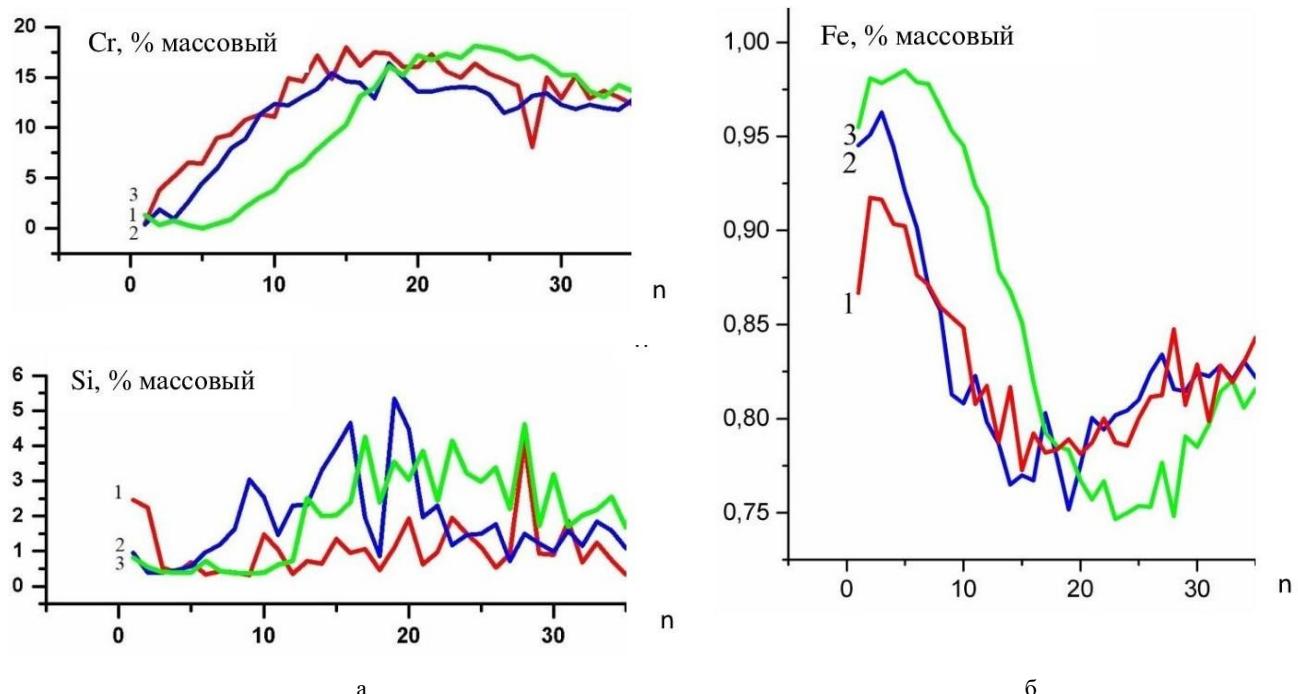


Рис.1. Изменение концентрации компонентов стали (% массовый) от поверхности вглубь образца в искусственно созданном дефекте (1) и точках свидетелях вне дефекта (2- со стороны дефекта, 3 – с обратной стороны) а) – Cr, Si; б) – Fe

Список литературы

- Соломатин А.Е., Орлова Е.А., и др. // ВАНТ. Серия: ядерно-реакторные константы. 2016. №5. С. 184-190.

С.Е. ПАНИН, Р.В. СМИРНОВ, А.К. КУТУКОВ, А.Н. БОЙКО, Е.А. ПЕГАНОВ, А.А. СЕРГЕЕЧЕВ
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

ИЗМЕНЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Исследовано влияние лазерной ударной обработки на усталостную прочность металлических материалов на примере титанового сплава ВТ6 и спецстали. Лазерная ударная обработка позволяет создавать в материале сжимающие напряжения, которые могут оказывать положительное влияние на усталостную прочность металлических деталей.

S.E. PANIN, R.V. SMIRNOV, A.K. KUTUKOV, A.N. BOYKO, E.A. PEGANOV, A.A. SERGEECHEV
State Research Center of the Russian Federation «Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research»

CHANGE OF THE FATIGUE STRENGTH OF METAL MATERIALS AFTER LASER SHOCK TREATMENT

The effect of laser shock treatment on fatigue strength of metal materials is researched. The example samples are titanium alloy and special steel. The laser shock treatment provides the creation of compressive stresses in the material that can have a positive influence on fatigue strength on metal parts.

В процессе эксплуатации различного оборудования значительная часть деталей подвергается повышенным механическим нагрузкам. Эти нагрузки приводят к изнашиванию и поломке деталей, что в свою очередь вызывает простой оборудования и требует затрат на его ремонт. С целью увеличения срока службы таких деталей предлагается модифицировать их внутреннюю структуру. Так как основные нагрузки приходятся на поверхность детали, то оптимальнее проводить модификацию приповерхностного слоя. Одним из методов модификации приповерхностного слоя является ударное воздействие на поверхность детали. Инструментом, с помощью которого осуществляется такое воздействие, может являться лазерное излучение, энергия которого вкладывается в энергию удара. Метод носит название лазерный наклёт. В данной работе проведено исследование усталостной прочности металлических материалов на примере титанового сплава ВТ6 и спецстали У8А после лазерного наклёпа.

Принцип лазерного наклёпа заключается в создании пластических деформаций в приповерхностном слое обрабатываемой детали. Для этого поверхность детали покрывается слоем-поглотителем, непрозрачным для лазерного излучения. Затем добавляется прозрачный для лазерного излучения слой, например вода. Сфокусированное лазерное излучение проходит через прозрачный слой и поглощается непрозрачным. Начинается испарение слоя-поглотителя и образуется плазменный факел. Давление в образовавшейся плазме быстро возрастает, что создаёт ударную волну, которая идёт на поверхность обрабатываемой детали. При этом от плазмы поверхность отделена слоем-поглотителем, а прозрачный слой с одной стороны защищает плазму от атмосферы, а с другой является отражателем ударной волны, что приводит к её усилению [1]. Поясняющая схема лазерного наклёпа приведена на рисунке 1 [2].

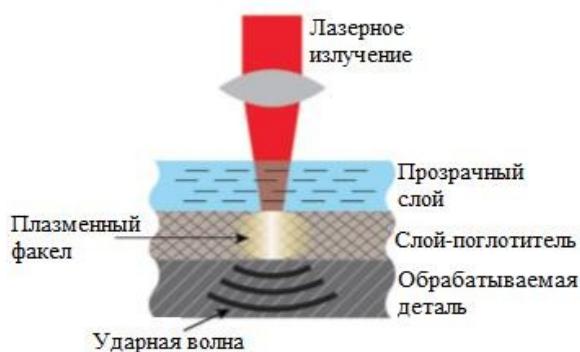


Рисунок 1 – Схема лазерного наклёпа

Лазерный наклёт обеспечивает создание в материале сжимающих напряжений, что может способствовать повышению усталостной прочности. Проведённые исследования в работе показали увеличение усталостной прочности после обработки лазерным наклёмом вплоть до 50%.

Работа выполнена в рамках государственного контракта от 17.04.2023 г. № Н.4к.241.09.23.1058.

Список источников

1. М. Волков, А. Кишалов и др. // Фотоника, вып. 3, 2014, с. 34-44;
2. Е.А. Пеганов, И.С. Макогон и др. // Х МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ "КОМАНДА". Сборник тезисов, с. 122-123. Санкт-Петербург, 2023

ПАРКЕВИЧ Е.В., ШПАКОВ К.В., ХИРЬЯНОВА А.И., ГАВРИЛОВ С.Ю.
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук 119991, Москва, Россия
**ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР И МЕТОДЫ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Представлены результаты по лазерному зондированию плазменных микроструктур, возникающих во время импульсных наносекундных газовых разрядов в малых воздушных промежутках. Обсуждаются ключевые проблемы диагностики плазменных микрообъектов и методы восстановления их характеристик в рамках решения прямых и обратных задач дифракции. Результаты работы носят общий характер и могут представлять интерес для обработки различных лазерных интерферограмм и тенеграмм фазовых микрообъектов, визуализируемых оптическими системами при наличии сильных дифракционных эффектов и эффекта дефокусировки.

PARKEVICH E.V., SHPAKOV K.V., KHIRIANOVA A.I., GAVRILOV S.YU.

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences 119991, Moscow, Russia

**LASER PROBING OF PLASMA MICROSTRUCTURES AND METHODS OF RESTORING THEIR
OPTICAL CHARACTERISTICS**

We present the results of laser probing of plasma microstructures arising in pulsed nanosecond gas discharges occurring in small air gaps. The key problems of diagnostics of micron-sized plasma objects and methods of restoring their characteristics within the framework of solving direct and inverse diffraction problems are discussed. The results are of a general nature and may be helpful in processing various laser interferograms and shadowgrams of phase objects visualized by optical systems in the presence of strong diffraction effects and the defocusing effect.

Восстановление оптических характеристик спорадичных плазменных микрообъектов при их визуализации в поле когерентного лазерного излучения представляется достаточно сложной задачей. При прохождении излучения сквозь неоднородную плазму возникают сложные дифракционные эффекты, а за счет дифракционного расплывания фронта волны регистрируемые яркостные и фазовые картины объекта претерпевают существенные изменения при увеличении дистанции их фотографирования позади выходной плоскости объекта. Ко всему прочему искажения вносит также и оптическая линзовая система, в которой реализованы такие техники лазерной диагностики, как интерферометрия, теневая и шлириен-фотосъёмка. Учитывая неопределенность настройки оптической системы на плазменный микрообъект, возникновение и эволюция которого в пространстве носит рандомный характер, возрастает влияние эффекта дефокусировки оптики. Не учет естественных дифракционных эффектов и эффекта дефокусировки при восстановлении оптических характеристик плазменного объекта может привести к некорректным результатам обработки и в принципе к неправильным взглядам на параметры и структуру исследуемого объекта. В данной работе мы последовательно раскрываем ключевые сложности по лазерной визуализации плазменных микрообъектов, а также приводим разработанные методы и подходы к восстановлению их оптических характеристик. Методы позволяют учесть, как влияние естественных дифракционных эффектов при прохождении излучения сквозь неоднородный плазменный объект, так и влияние самой оптической системы на регистрируемые картины объекта. Демонстрируется эффективность разработанных методов на примере лазерной съёмки реальных плазменных образований, возникающих во время импульсных наносекундных газовых разрядов, а также проводится процедура восстановления их характеристик. Результаты теоретических и модельных исследований находятся в хорошем согласии с экспериментом.

Работа поддержана грантом РНФ № 24-79-10167.

Список литературы

1. Parkevich E.V. et al. Strong diffraction effects accompany the transmission of a laser beam through inhomogeneous plasma microstructures. *Physical Review E* 109.5 (2024): 055204.
2. E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov, S.Y. Gavrilov. The features of the phase object visualization in the field of coherent laser radiation predicted in the first Rytov approximation. *Computer Optics*. 49 (4), 2025.
3. E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov. Solving of the inverse diffraction problem in the first Rytov approximation for retrieving the phase object dielectric permittivity. *Computer Optics*. 2025 (in print).

И.Р. ОВСЯНКИН, Ф.В. ФУНТОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.В. ПЛАТОНОВ, А.А. ТИМОФЕЕВ, Е.С.
ЕРМИЛОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЯ NiZnAl₂O₃, СОЗДАННОГО С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрено влияние лазерной постобработки на характеристики поверхностного слоя покрытия NiZnAl₂O₃, сформированного методом холодного газодинамического напыления (ХГНД) на подложках низкоуглеродистой стали Ст3 с использованием установки "ДИМЕТ – 404". Перед нанесением покрытий поверхности подложек подвергали очистке с использованием системы лазерной очистки "LightCLEAN" производства НТО "ИРЭ-Полус". Последующую обработку покрытий проводили с использованием импульсного волоконного лазера. Оценено изменение шероховатости поверхности и внутренней структуры поверхностного слоя при различных режимах лазерной обработки.

I.R. OVSYANKIN, F.V. PHUNTOV, V.N. PETROVSKIY,
A.V. PLATONOV, A.A. TIMOFEEV, E.S. ERMILOVA,

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

INFLUENCE OF LASER RADIATION ON THE CHARACTERISTICS OF A COATING NiZnAl₂O₃, CREATED BY LOW-PRESSURE COLD SPRAYING

The effect of laser post-treatment on the characteristics of the surface layer of the NiZnAl₂O₃ coating formed by the method of low-pressure cold spraying (LPCS) on substrates of low-carbon steel St3 using the DIMET - 404 installation is considered. Before coating, the surfaces of the substrates were cleaned using the "LightCLEAN" laser cleaning system manufactured by NTO "IRE-Polus". Subsequent coating treatment was performed using a pulsed fiber laser. The change in surface roughness and the internal structure of the surface layer under various laser treatment modes is estimated.

Основные методы нанесения защитных покрытий включают в себя технологии термического напыления, такие как высокоскоростное кислородно-топливное (HVOF) и лазерное осаждение материалов (LMD). HVOF- напыление позволяет наносить покрытия из широкого спектра материалов, которые отличаются высокой износостойкостью при относительно низких затратах. Однако такие покрытия имеют ограниченную адгезионную прочность из-за плохого механического сцепления между покрытием и подложкой. Кроме того, они трудно поддаются ремонту и часто имеют пористость в диапазоне 1–2%. Технология LMD позволяет получать высококачественные покрытия без пор и трещин, однако типичная толщина покрытия обычно слишком велика для защиты от износа и коррозии, а достижимая скорость обработки поверхности слишком мала для нанесения покрытия на крупные детали.

Ещё одним актуальным методом является метод холодного газодинамического напыления низкого давления. Эта технология не требует особых условий среды, проста в эксплуатации, небольшой нагрев присадочного материала (150–500°C) обеспечивает высокую инвазивность технологии по отношению к защищаемому объекту, а добавление твёрдых порошков (например: корунд) позволяет увеличить адгезионные показатели защитного слоя. Однако, несмотря на всю простоту и эффективность, есть ряд характеристик технологии, которые требуют усовершенствования для дальнейшей востребованности.

Целью настоящего исследования было изучение влияния лазерной постобработки на характеристики поверхностного слоя покрытия NiZnAl₂O₃ на подложках из стали СТ3, созданных технологией ХГНД. Выбранные покрытия подвергались поверхностной обработке методом плавления с использованием импульсного волоконного лазера со следующими параметрами: длительность импульса 100 нс, частота повторения импульсов 20 кГц, диаметр пучка лазерного излучения 800 мкм. Параметры обработки были подобраны таким образом, чтобы обеспечить повторное расплавление покрытия только в приповерхностной зоне без какого-либо разрушающего воздействия на тонкую стальную подложку. Обработка проводилась в окружающей среде без применения какой-либо специальной защитной атмосферы. На рисунке 1 представлены примеры поверхностного слоя покрытий до (а) и после лазерной обработки (б).

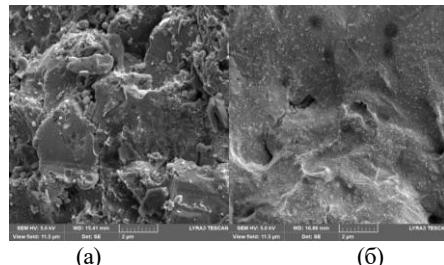


Рисунок 1 - Пример поверхностного слоя покрытия NiZnAl₂O₃ до (а) и после (б) лазерной обработки.

Н.С. ПОКРЫШКИН, В.Г. ЯКУНИН, В.Н. МАНЦЕВИЧ, А.М. СМИРНОВ, В.Ю. ТИМОШЕНКО
 Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

АПКОНВЕРСИОННАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Показана высокая эффективность механизмов апконверсии в перовскитных нанокристаллах CsPbBr_3 , в результате которой квантовый выход апконверсионной фотолюминесценции оказывается сопоставим с квантовым выходом без апконверсии.

Показано, что в механизме апконверсии участвуют одно- и двухфононные процессы с сопоставимой вероятностью.

N.S. POKRYSHKIN, V.G. YAKUNIN, V.N. MANTSEVICH, A.M. SMIRNOV, V.Y. TIMOSHENKO
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

UPCONVERSION PHOTOLUMINESCENCE OF PEROVSKITE NANOCRYSTALS UNDER RESONANT LASER EXCITATION

The high efficiency of upconversion mechanisms in CsPbBr_3 perovskite nanocrystals is demonstrated, as a result of which the quantum yield of upconversion photoluminescence is comparable to the quantum yield of photoluminescence without upconversion. It is shown that one- and two-phonon processes with comparable probabilities participate in the upconversion mechanism.

В результате лазерного возбуждения в галогенидных перовскитных нанокристаллах (ПНК) может наблюдаться значительная доля апконверсионной (антистоксовой) фотолюминесценции (АФЛ). В работе исследовались особенности стоксовой и антистоксовой фотолюминесценции (ФЛ) при непрерывном лазерном возбуждении в ПНК состава CsPbBr_3 , которые синтезировались методом переосаждения с помощью лигандов при комнатной температуре. Нанокристаллы кубической формы имели средние размеры около 25 нм. Источниками лазерного излучения являлись: аргоновый лазер с перестраиваемой генерацией, непрерывные DPSS-лазеры на 521 и 532 нм.

Квантовый выход ФЛ ПНК CsPbBr_3 (рис.1) практически не зависит от длины волны возбуждения в стоксовом режиме ФЛ вплоть до совпадения линии возбуждения с полосой ФЛ (около 521 нм). При существенном доминировании апконверсионной части ФЛ (возбуждение на 532 нм) наблюдается снижение квантового выхода ФЛ в 1.5 – 6 раз. Этот результат может объясняться тем, что поглощение света на 532 нм в ПНК CsPbBr_3 оказывается очень малым и осуществляется в большей степени дефектными нанокристаллами, которые в свою очередь имеют низкий квантовый выход ФЛ. Однако при возникновении необходимости апконверсии вероятность переизлучения поглощённого фотона не снижается на порядки. Если бы АФЛ в ПНК являлась процессом одновременного поглощения фотона и нескольких фононов (энергия фонона в CsPbBr_3 ~17 мэВ [1], а апконверсия в CsPbBr_3 может доходить до ~100 мэВ [2]), то вероятность таких многофононных процессов была бы крайне низка и квантовый выход не мог бы достигать значений, сопоставимых с квантовым выходом ФЛ без апконверсии. Температурная зависимость стоксовой и антистоксовой частей ФЛ (рис. 2) показала, что на фоне общего тушения ФЛ с ростом температуры наблюдается увеличение доли апконверсионной части ФЛ, что можно связать с ростом числа фононов, участвующих в процессе апконверсии. Наблюдаемое изменение отношения антистоксовой и стоксовой частей ФЛ изменяется не линейно и не квадратично с ростом числа фононов (как это было бы в случаях одно- и двухфононных процессов соответственно), а занимает промежуточное положение. В формировании АФЛ принимают участие одно- и двухфононные процессы, а увеличение энергии фотонов на большие значения до ~100 мэВ не может объясняться простым одновременным поглощением нескольких фононов.

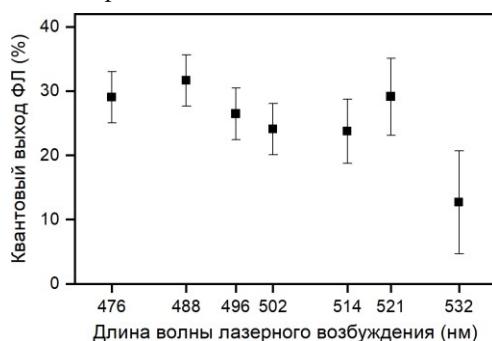


Рис. 1. Квантовый выход ФЛ перовскитных нанокристаллов CsPbBr_3 при непрерывном лазерном возбуждении на различных длинах волн.

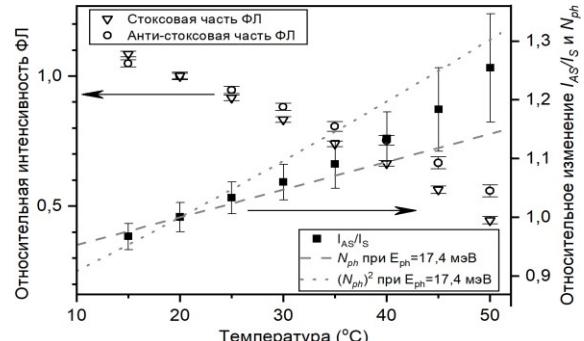


Рис. 2. Изменения интенсивностей антистоксовой и стоксовой частей ФЛ нанокристаллов CsPbBr_3 , а также изменение числа фононов в зависимости от температуры образца

Список литературы

1. Ghosh S., Rana D., Pradhan B. and others // J. Raman Spectrosc. 2021. Vol. 52, № 12. P. 2338–2347.
2. Granados del Águila A., Do T. T. H., Xing J. and others // Nano Res. 2020. Vol. 13. P. 1962–1969.

С.А.ПОРТНОВ^{1,2}, С.С.ШАЛЯПИН^{1,2}, А.О.БОГОРОДСКИЙ³, В.И.БОРЩЕВСКИЙ³, М.А.ШЕВЧЕНКО¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт биоорганической химии им. Академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова.

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРЫХ ГАРМОНИК НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛАГЕНА В ЛЁГКИХ МЫШЕЙ

Методом спектрального разделения проведена обработка изображения тотального препарата дали легкого мыши, полученного при помощи двухфотонной микроскопии. На основе канала генерации вторых гармоник было проведено построение поверхностей, среди которых был выделен автономный кровеносный сосуд. Был предложен подход для оценки присутствия патогенов или частиц в сосудах легких.

S.A.PORTNOV^{1,2}, S.S.SHALYAPIN^{1,2}, A.O.BOGORODSKIY³, V.I.BORSHEWSKIY³, M.A.SHEVCHENKO¹.

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

² Institute of Bioorganic Chemistry named after Academicians M.M. Shemyakin and Yu.A. Ovchinnikov.

³ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

GENERATION OF SECOND HARMONICS BASED ON THE ANISOTROPIC PROPERTIES OF COLLAGEN IN THE LUNGS OF MICE

An image of a whole-mount mouse lung lobe specimen, obtained by two-photon microscopy, underwent a spectral unmixing, and second harmonic generation spectra were acquired. Based on the second harmonic generation channel, the surfaces of vessels and airways were built, and the vessel surface was extracted using further processing. The approach for detecting pathogens or particles in the lung vessels was proposed.

Основная проблема оптической микроскопии – низкое проникновение в образец и низкий контраст изображения. Двухфотонная микроскопия позволяет получать изображения толстых срезов тканей и даже органов мелких лабораторных животных на глубине до 500 мкм. Еще одно преимущество двухфотонной микроскопии в возможности использовать комбинацию флуоресцентного окрашивания с процессами нелинейной оптики, такими как, генерация вторых гармоник.

В работе с использованием лазерного сканирующего микроскопа Zeiss LSM780, укомплектованного двухфотонным лазером, получали трёхмерные изображения тотального препарата дали лёгкого мыши. Для визуализации препаратов, содержащих красители AlexaFluor 488 (эпителий воздухоносных путей) и AlexaFluor 568 (предварительно окрашенный патоген) была подобрана оптимальная частота лазера 1030 нм.

Визуализация кровеносных сосудов и дыхательных путей была проведена с использованием нелинейного процесса – генерации вторых гармоник, который основан на анизотропных свойствах среды. Основным компонентом стенок сосудов и дыхательных путей, обладающим анизотропными свойствами, является белок коллаген. Также анизотропными свойствами обладает белок миозин.

Процесс генерации вторых гармоник заключается в прохождении электромагнитной волны через анизотропную среду, которая затем поляризуется. Возникает поляризованность-суммарный дипольный момент в единице объема вещества.

Напряженность электромагнитной волны:

$$E \sim E_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

В нелинейной среде поляризованность:

$$P \sim E, E^2, \text{ а } E^2 \sim E^2 \cos^2(\omega t), \text{ где } \cos^2(\omega t) = \frac{1 + \overline{\cos(2\omega t)}}{2} \quad (2),$$

где Р-поляризованность, Е-напряжённость электромагнитной волны.

На выходе получается две электромагнитные волны с напряженностями, пропорциональными единичной и удвоенной частотам.

Спектральное разделение было проведено при помощи программного обеспечения ZEN. Были получены два канала: ГВГ и AlexaFluor 488. Поверхности, построенные на основе канала ГВГ являлись комбинацией кровеносных сосудов и дыхательных путей, поверхности на основе канала AlexaFluor 488 представляли собой дыхательные пути. В программном обеспечении Imaris с использованием функции фильтров была построена автономная поверхность кровеносного сосуда. Была проведена оценка распределения предварительно окрашенного патогена. Патоген был обнаружен в дыхательных путях, но не в кровеносных сосудах.

Список литературы

1. Дуденкова В. В. [и др.]. Оценка структуры и состояния коллагена по сигналу генерации второй гармоники // Успехи биологической химии. 2019. Т. 59. С. 181–218. ————— 102
2. Borile G. [et al.]. Label-Free Multiphoton Microscopy: Much More Than Fancy Images // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 5(22) :2657. DOI: 10.3390/ijms22052657.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. — М.: Астрель, 2003.

А.В. РЕБЕЗОВ¹, А.В. МИХАЙЛЮК¹, И.Ю. ТИЩЕНКО¹, К.Л. ГУБСКИЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТОЛА ЭЛЕКТРОННОГО ЛИТОГРАФА

Создана и реализована оптическая модель двухпроходного гетеродинного лазерного интерферометра с разрешением ~10 нанометров с устойчивостью к угловым смещениям измерительного зеркала на литографическом столе.

A.V. REBEZOV¹, A.V. MIHAYLYUK¹, I. YU. TISHCHENKO¹,
K. L. GUBSKIY¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

HETERODYNE INTERFEROMETER FOR MEASURING ELECTRON LITHOGRAPH TABLE DISPLACEMENTS

An optical model of a two-pass heterodyne laser interferometer with a resolution ~10 nanometers and resistance to angular displacements of the measuring mirror on the lithography table has been created and implemented.

Современные отечественные системы литографической обработки кремниевых пластин для производства процессоров имеют большой потенциал модернизации. Полупроводниковые транзисторы производятся по технологическому процессу в 28 нанометров, что в три раза превышает технологический процесс зарубежных аналогов [1]. Одним из способов уменьшения погрешности их производства является создание оптической системы обратной связи литографического стола.

Целью работы является разработка и реализация двухпроходной оптической системы, устойчивой к угловым смещениям измерительного зеркала [2]. На рис.1 показана схема экспериментальной установки. Был использован лазер ГН-2П с длиной волны 633 нм и выходной мощностью в 2 мВт. ГН-2П обладает достаточной поляризованностью и стабильностью для реализации данной оптической системы [3].

Использование гетеродинной системы обеспечивает повышенную точность по сравнению с гомодинными аналогами [4] за счет исследования картины биений несущей частоты, происходящих на меньших частотах [5]. За счет реализации квадратурной системы, помимо данных о размере перемещений, сигнал несет в себе информацию о направлении движения литографического стола [6].

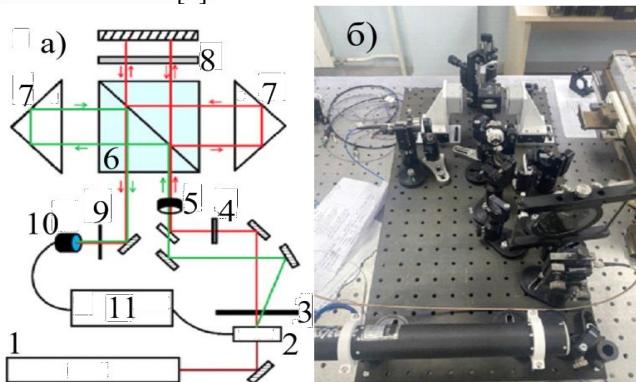


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и ее реализация (б): 1 - лазер, 2 - АОМ, 3,9 - поляризаторы, 4 - фазовая пластина $\lambda/2$, 5 - расширитель пучка, 6 - поляризационный куб, 7 - трипель призмы, 8 - фазовая пластина $\lambda/4$, 10 - коллиматор, 11 - фотоприемник, синхронизированный с частотой АОМ.

Список литературы

1. Li A. Шесть ключевых этапов производства микросхем // ASML Stories. 2023. URL: <https://www.asml.com> (дата обращения: 04.12.2024).
2. Řeřucha, Š., Holá, M., Šarbort, M., Hrabina, J., Oulehla, J., Číp, O., & Lazar, J. (2021). Compact differential plane interferometer with in-axis mirror tilt detection. Optics and Lasers in Engineering, 141, 106568. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106568>
3. Гармонов А. А., Дубов В. П., Потоцкий А. Ю. Эволюция выходной мощности и поляризации мод при установлении стационарного теплового режима в двухмодовых гелий-неоновых лазерах // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 3. С. 94–106. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-94-106.
4. Cyclic error compensation in interferometry systems: пат. США № 7576868 B2. Заявл. 23.06.2006; опубл. 18.08.2009.
5. Казиева Т.В. Гетеродинная лазерная интерферометрия для метрологического обеспечения измерений перемещений в сканирующей зондовой микроскопии: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.21 — МИФИ, Москва, 2017. — 134 с.
6. Губский К.Л. Лазерная анемометрия в исследованиях ударно-волновых процессов и экстремального состояния вещества: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.21 — МИФИ, Москва, 2012. — 132 с.

С.В. ВАСИЛЬЕВ, А.Л. СИТКЕВИЧ
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методом рентгеновской дифрактометрии обнаружено изменение кристаллической структуры титана в зоне воздействия на их поверхность лазерного излучения с плотностью потока $10^4 - 10^5 \text{ Вт/см}^2$. Показано, что при действии лазерного излучения на поверхность титана его кристаллическая структура меняется в облученной зоне с равновесной на искаженную (имеющую форму параллелепипеда, отличную от куба). Сделано предположение о связи обнаруженного эффекта с особенностями температурного нагрева поверхности металла.

S.V. VASILIEV, A.L. SITKEVICH
Ya.Kupala Grodno State University, Grodno, Belarus

INFLUENCE OF PECULIARITIES OF TEMPERATURE HEATING OF TITANIUM SURFACE ON CHANGES OF ITS CRYSTAL STRUCTURE UNDER THE INFLUENCE OF LASER RADIATION

The X-ray diffractometry method detected the change in the crystal structure of titanium in the zone of exposure of their surface to laser radiation with a flux density of $10^4 - 10^5 \text{ W/cm}^2$. It is shown that under the action of laser radiation on the surface of titanium its crystal structure changes in the irradiated zone from equilibrium to distorted (having the shape of a parallelepiped, different from a cube). An assumption is made about the connection of the detected effect with the peculiarities of temperature heating of the metal surface.

Лазерное излучение является высокоэнергетическим и интенсивным источником света, который может подвергать материалы различного типа воздействию. В последние годы интерес к исследованию воздействия лазерного излучения на структуры материалов значительно возрос, так как это может создать новые возможности для разработки и улучшения различных промышленных и научных процессов.

Среди различных способов упрочнения материалов широко и эффективно используется их лазерная обработка. При этом наблюдается четко выраженное изменение физических свойств материала. Например, после лазерной обработки многих металлов их микротвердость может увеличиваться на 10 – 30 %. При этом не наблюдается ни изменение состава вещества, ни каких-либо выраженных фазовых переходов.

Следует, однако, отметить, что механизмы указанного воздействия лазерного излучения еще недостаточно изучены. Для раскрытия физической сущности этих механизмов необходимо построение моделей, позволяющих описывать разнообразные процессы.

На наш взгляд механизм изменения кристаллической структуры металлов основан на тепловом воздействии лазерного излучения, который заключается в том, что энергия лазерного излучения, поглощаемая непосредственно электронной подсистемой металла, практически мгновенно передаётся в решётку и нагревает её от исходной, комнатной, температуры до температуры при которой возникают значительные микронапряжения в облученной зоне. И именно периодичность процесса нагрев – охлаждение и обуславливает столь значительные изменения кристаллической структуры металла.

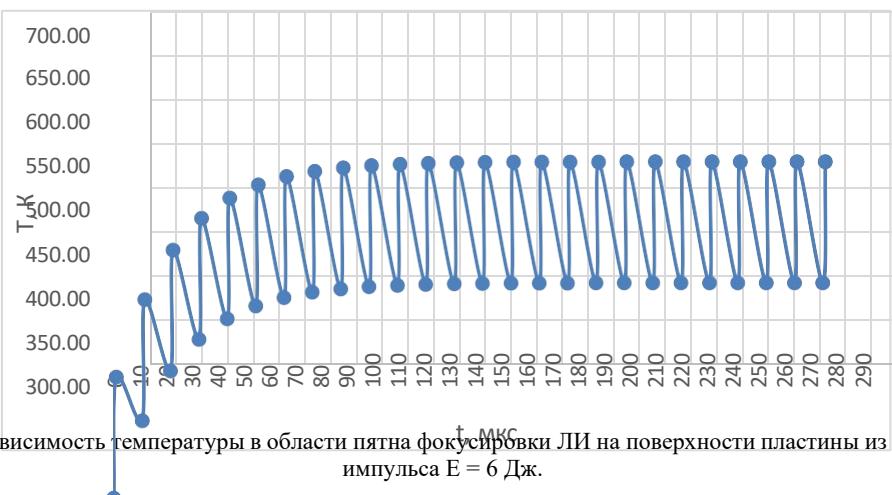


Рис. 1. Временная зависимость температуры в области пятна фокусировки ЛИ на поверхности пластины из титана при энергии импульса $E = 6 \text{ Дж}$.

Е.В. УЛТУРГАШЕВА, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Э.Р. ТОЛОРДАВА, С.Н. ШЕЛЫГИНА, С.П. БАБИНА,
И.Н. САРАЕВА, С.И. КУДРЯШОВ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ФИАН, Москва, Россия

EX VIVO ИССЛЕДОВАНИЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ

Проведено исследование влияния плотности энергии лазерного излучения, скорости сканирования и толщины металлической пленки при нанесении наночастиц серебра/меди методом лазерно-индуцированного прямого переноса на инфицированную свиную кожу на антибактериальную активность наночастиц.

Для этого был подобран оптимальный режим переноса донорного материала и была проведена оценка антибактериальной активности посредством микробиологических высеек.

E.V. ULTURGASHEVA, A.A. NASTULYAVICHUS, E.R. TOLORDAVA, S.N. SHELYGINA,
S.P. BABINA, I.N. SARAeva, S.I. KUDRYASHOV

Federal State Budgetary Institution of Science LPI (Lebedev Physical Institute), Moscow, Russia

EX VIVO STUDIES OF ANTIBACTERIAL METAL NANOPARTICLES

The effect of laser radiation energy density, scanning speed and metal film thickness when applying silver/copper nanoparticles by laser-induced forward transfer to infected pig skin on the antibacterial activity of nanoparticles was investigated.

For this purpose, an optimal mode of donor material transfer was selected and the antibacterial activity was evaluated by microbiological seeding.

Существует огромное количество штаммов бактерий, устойчивых к антибиотикам и другим агентам, что требует разработки новых подходов для получения новых антибиотиков. Использование наночастиц металлов – один из многообещающих способов подавления роста бактерий. Наночастицы с антибактериальной активностью могут уменьшить или устраниć развитие более устойчивых бактерий, поскольку наночастицы воздействуют на несколько биомолекул одновременно, избегая развития резистентных штаммов [1].

Метод лазерно-индуцированного прямого переноса (ЛИПП) позволил получить частицы разного размера и с разной антибактериальной активностью. В качестве донорной подложки использовали тонкие пленки меди/серебра на полиэтилентерефталате (ПЭТ), а в качестве акцепторных подложек использовалась свиная кожа с нанесенной на нее планктонной культурой *Staphylococcus aureus*. Сканирование пленки производилось со скоростями: 500-3000 мм/с и плотностями энергии: 8-24 Дж/см². Расстояние между металлической пленкой и фрагментом свиной кожи составляло 1 мм. Экспериментальная схема представлена на рис.1.



Рис. 1. Экспериментальная схема

Исследования показали, что наночастицы серебра/меди проявляют высокие антимикробные свойства и вызывают практически полную гибель бактерий для некоторых режимов. Наибольшая эффективность наблюдается для режимов со скоростями сканирования 500-1500 мм/с для всех толщин пленок. Концентрация наночастиц, наносимая на образец, не превышает 76 мкг/см².

Благодарность: работа поддержана министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2023-603).

Список литературы

1. Ulturgasheva E., Nastulyavichus A., Tolordava E. et al. // BioNanoScience. 2025. Vol. 15, №. 1. P. 1-9.

А.В. ЧАПЛЫГИН, М.Ю. ЯКИМОВ, И.В. ЛУКОМСКИЙ, С.С. ГАЛКИН, М.А. КОТОВ, А.Н. ШЕМЯКИН,
Н.Г. СОЛОВЬЕВ, А.Ф. КОЛЕСНИКОВ
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКА ПЛАЗМЫ И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

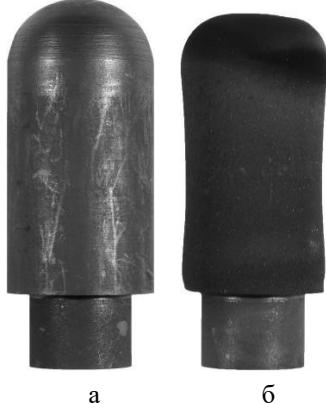
Исследовано поведение различных высокотемпературных материалов в дозвуковых струях плазмы установки ВГУ-4 при дополнительном лазерном нагреве поверхности. Эксперименты проведены в дозвуковых диссоциированных потоках азота, углекислого газа и их смеси. Испытаны образцы из графита, карбида кремния и теплозащитного материала на основе кварцевых волокон.

A.V. CHAPLYGIN, M.Yu. YAKIMOV, I.V. LUKOMSKII, S.S. GALKIN, M.A. KOTOV,
A.N. SHEMYAKIN, N.G. SOLOVYOV, A.F. KOLESNIKOV
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL STUDY OF MATERIALS BEHAVIOR UNDER COMBINED EXPOSURE TO PLASMA FLOW AND LASER RADIATION

The behavior of various high-temperature materials in subsonic plasma jets of the VGU-4 facility with additional surface laser heating has been studied. Experiments were carried out in subsonic dissociated flows of nitrogen, carbon dioxide and their mixture. Samples made of graphite, silicon carbide and heat-shielding material based on quartz fibres were tested.

Разработка тепловой защиты спускаемых аппаратов, предназначенных для входа в атмосферы Марса, Венеры и Титана, требует испытаний материалов в высокотемпературных химически активных газовых потоках. Подобные эксперименты могут быть проведены в струях плазмы высокочастотных индукционных плазмотронов. Область моделирования энталпии потока для существующих установок ограничена их максимальной мощностью. Кроме того, для более полного моделирования условий входа в атмосферу нередко требуется реализовать комбинированный радиационно-конвективный нагрев поверхности. Возможности ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 были существенно расширены за счет применения дополнительного источника лазерного нагрева [1]. В дозвуковых струях плазмы азота и углекислого газа исследовано поведение образцов из карбида кремния [2], для лазерного нагрева поверхности использовался волоконный иттербийовый лазер IPG Photonics YPLN-1-100-200-R мощностью 200 Вт. Применение более мощного источника лазерного излучения Raycus RFL C1500 позволило изучить высокотемпературную абляцию графита МПГ-7 в потоках плазмы азота (рис. 1), углекислого газа и их смесях. Максимальная достигнутая температура на поверхности образцов из графита в процессе комбинированного воздействия составляла более 3700 К.



Rис. 1. Образец из графита МПГ-7 до (а) и после (б) воздействия плазмы азота с дополнительным нагревом поверхности лазерным излучением

Работа выполнена по теме гранта РНФ 22-79-10083 (<https://rscf.ru/project/22-79-10083/>) с использованием ВЧ-плазмотрона ВГУ-4, который входит в состав уникальной научной установки РФ «Высокочастотные индукционные плазмотроны ВГУ-3 и ВГУ-4» (<http://www.ckp-rf.ru/usu/441568>).

Список литературы

1. Chaplygin A.V., Kotov M.A., Yakimov M.Yu. and others // Fluids. 2023. 8(1).
2. Chaplygin A.V., Galkin S.S., Kotov M.A. and others // Fluid Dynamics. 2024. Vol. 58. No. 8

М.Д. ЧЕБАН¹, С.А. ФИЛАТОВА¹, Д.Н. МАМОНОВ², К.А. ЩЕРБАКОВ², П.В. ПАРАБИН³

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара, Москва, Россия

ЛАЗЕРНАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по лазерной очистке нержавеющей стали марки 08Х18н10т с сформированным имитирующим уран-плутониевое загрязнение основе оксида церия IV (CeO_2) природного изотопного состава. Также приведены результаты исследования по лазерной дезактивации радиоактивных загрязнений на поверхности нержавеющей стали, содержащих соли урана (U) и плутония (Pu). Эксперименты проводились под слоем водного раствора поливинилового спирта (ПВС), который надежно фиксировал удаленные загрязнения. К тому же, после полимеризации, ПВС легко снимался с поверхности образца в виде цельной пленки.

M.D. CHEBAN¹, S.A. FILATOVA¹, D.N. MAMONOV², K.A. SHCHERBAKOV², P.V. PARABIN³

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³Advanced Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A. A. Bochvar, Moscow, Russia

LASER DEACTIVATION IN A POLYMERIZING ENVIRONMENT

This paper presents the results of experimental studies on laser cleaning of AISI 304 stainless steel with simulated non-radioactive contamination based on cerium oxide IV (CeO_2). It also includes the results of laser decontamination of radioactive contaminants on stainless steel surfaces containing uranium (U) and plutonium (Pu) salts. The experiments were conducted under a layer of an aqueous solution of polyvinyl alcohol (PVA), which reliably fixed the removed contaminants. Furthermore, after polymerization, the PVA was easily removed from the sample surface as a solid film without damaging the material.

Дезактивация поверхностей конструкций и оборудования, накопивших радионуклиды урана и плутония в процессе эксплуатации, является важной операцией, проводимой как на действующих объектах атомной отрасли, так и при выводе их из эксплуатации. Так как известно, что основной объём радиоактивных загрязнений концентрируется в поверхностных слоях материала в виде отложений или интегрированы в оксидной пленке. Лазерные методы очистки демонстрируют высокую эффективность в удалении этих слоев вместе с загрязнениями, обеспечивая точность позиционирования и минимальный объем вторичных отходов.

В настоящей работе в качестве источника лазерного излучения использовался импульсный YAG:Nd-лазер с длиной волны излучения 1064 нм, длительностью импульса 8 нс, частотой повторения 100 Гц и энергией в импульсе 12 мДж. Лазерное излучение доставлялось по свободному оптическому тракту к гальванометрическому сканатору, где далее производилось сканирование загрязненной поверхности с предварительно нанесенным слоем жидкого раствора поливинилового спирта. Для очистки применялись три режима сканирования, различающиеся по степени перекрытия соседних участков облучения, соответствующих пятну лазерного пучка на поверхности. Затем образцы сушили при комнатной температуре в течение не менее 12 часов. После высыхания и полимеризации пленка ПВС была равномерной по толщине, легко удалялась с поверхности без повреждений.

Предварительные эксперименты проводились на образцах с покрытием, моделирующим радиоактивные загрязнения [1]. В качестве имитатора использовался диоксид церия (CeO_2) естественного изотопного состава, обладающий теплофизическими свойствами, близкими к диоксидам урана (UO_2) и плутония (PuO_2). Лазерная

очистка в один проход во всех режимах перекрытия позволила удалить более 90% загрязнений с поверхности модельных образцов. При работе с реальными загрязнениями во всех режимах перекрытия лазерного пучка наилучшие и достаточные результаты снижения остаточного фона альфа- и бета-частиц были достигнуты уже после одного прохода (Рис. 1).

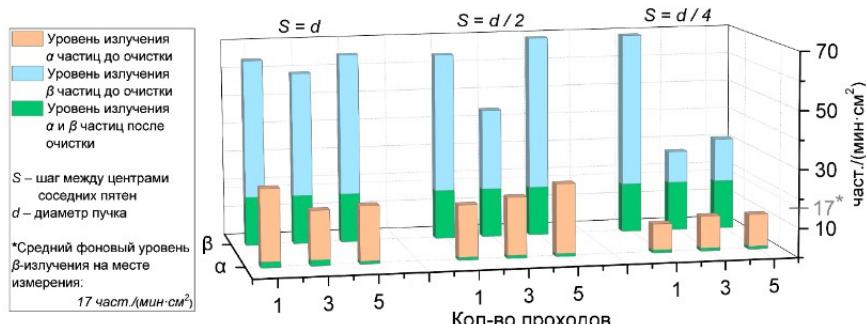


Рис. 1. Плотность потока α -частиц и β -частиц до и после лазерной дезактивации в ПВС

Список литературы

1. M. Cheban, S. Filatova, Y. Kravchenko, K. Scherbakov, D. Mamonov, S. Klimentov, M. Savinov, M. Chichkov, Laser surface cleaning of simulated radioactive contaminants in various technological environments, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 56, Issue 7, 2024, P. 2775-2780.

Е.Д. ЧИВИЛИС, А.П. БОГАТОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, С.А. ЗИБРОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ
 Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

АНОМАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СПЕКТР ИЗЛУЧАЮЩЕГО С ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРА

В спектрах ряда лазеров, излучающих с поверхности, обнаружены релаксационные пики высоких порядков. Экспериментально прослежена их эволюция с ростом тока накачки. Особенности спектров могут быть качественно объяснены глубокой частотной модуляцией, вызванной релаксационными колебаниями динамических переменных лазера.

E.D. CHIVILIS, A.P. BOGATOV, V.V. VASSILIEV, M.I. VASKOVSKAYA, V.L. VELICHANSKY,
 S.A. ZIBROV, E.A. TSYGANKOV, D.S. CHUCHELOV

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

UNUSUAL INFLUENCE OF RELAXATION OSCILLATION ON THE SPECTRUM OF A SURFACE EMITTING LASER

High-order relaxation sidebands have been observed in the spectrum of several surface-emitting lasers. Their evolution with increasing pumping current has been experimentally studied and qualitatively explained by deep frequency modulation induced due to relaxation oscillations of the laser's dynamic variables.

Частота релаксационных колебаний (РК) поля и инверсии в диодных лазерах является параметром, влияющим на их шумовые, модуляционные и спектральные характеристики. Согласно теории [1] при небольшом превышении тока над порогом в спектре одномодовых лазеров, кроме несущей, появляется большое число боковых пиков, интервал между которыми равен частоте РК. Экспериментально обычно наблюдаются только пики первого порядка. В работе по оптическим спектрам исследовалась частотная СВЧ модуляция серии излучающих с поверхности лазеров. Девять образцов, с одинаковыми структурами, оксидной апертурой ($\approx 2,5$ мкм) и пороговыми токами продемонстрировали высокую эффективность модуляции на частоте 4,6 ГГц. Однако их собственные спектры, в которых проявляются РК, отличаются большим разнообразием. Во всех образцах при токах чуть больше порогового в спектре наблюдались релаксационные пики (РП), причем только в двух образцах они были малозаметны. Спектры двух других из серии, напротив, содержали РП высоких порядков с большой амплитудой. В спектре одного из них с увеличением тока накачки наблюдалась уникальная эволюция: сразу за пороговым током, с низкочастотной стороны появлялся второй пик, отстройка которого от несущей с ростом тока увеличивалась; затем происходило уширение спектра, после чего в спектральном контуре появлялось множество пиков высоких порядков (рис. 1). То, что происхождение многопичковой структуры обусловлено РК, подтверждается линейной зависимостью квадрата частотного интервала между соседними пиками от мощности.

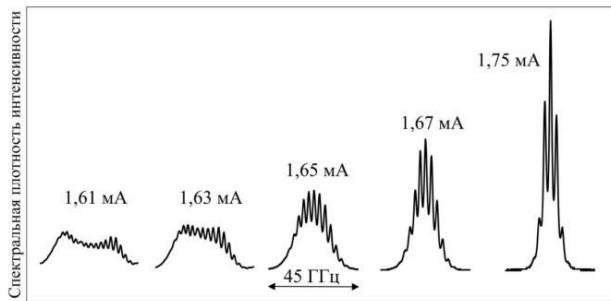


Рис. 1. Эволюция оптического спектра VCSEL №2 от тока накачки после этапа аномального уширения спектра. Пороговый ток 0,95 мА. Частотные масштабы по горизонтали и линейный по вертикали одинаковы для всех спектров.

При дальнейшем росте тока амплитуда центрального пика все более доминирует, что соответствует обычному поведению спектров с РП. Исследование причин, определяющих разнообразие околопороговых спектров, будет продолжено. Большое число РП в диапазоне токов 1,61–1,67 мА скорее всего связано с большим индексом частотной модуляции, который может возникать, если флуктуации амплитуды поля сопоставимы с его средним значением. Когда отношение флуктуации амплитуды к среднему значению не является параметром малости, теоретическое описание эффектов сильно усложняется. Близость режима к порогу означает большую роль усиленного спонтанного излучения. Анализ динамики системы в этих условиях, по-видимому, требует анализа взаимодействия не детерминированных функций числа фотонов и электронов в активной области, а их вероятностных распределений. Авторы благодарны сотрудникам ФТИ им. А.Ф. Иоффе Н.А. Малееву и М.А. Боброву за предоставление лазеров.

Список литературы

1. K. Vahala, A. Yariv// IEEE J. Quantum Electron. 1983. Vol. 18, № 6. P. 1102–1109.

ШАЛЯПИН С.С.^{1,2}, ПОРТНОВ С.А.^{1,2}, БОГОРОДСКИЙ А.О.³, БОРЩЕВСКИЙ В.И.³, ШЕВЧЕНКО М.А.²

¹*Государственный Научный Центр Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова Российской академии наук, Москва*

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва*

³*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Долгопрудный*

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАТОГЕНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕРАЦИЯХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЕЙ

Получены трехмерные изображения иммуногистологически окрашенных и оптически просветленных тотальных препаратов легких мышей с использованием флуоресцентной конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. Проведена обработка полученных изображений, позволяющая визуализацию спор гриба рода *Aspergillus* и дыхательных путей, получена 3D модель рассматриваемого объекта. Был предложен подход, позволяющий проводить оценку распределения микрочастиц в различных регионах дыхательных путей.

SHALYAPIN S.S.^{1,2}, PORTNOV S.A.^{1,2}, BOGORODSKY A.O.³, BORSHCHEVSKIY V.I.³, SHEVCHENKO M.A.²

¹*State Scientific Center Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Bioorganic Chemistry named after Academicians M.M. Shemyakin and Yu.A. Ovchinnikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

²*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow*

³*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)", Dolgoprudny*

ASSESSMENT OF DISTRIBUTION OF PATHOGENS IN DIFFERENT GENERATIONS OF THE RESPIRATORY TRACT

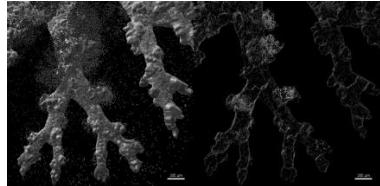
Three-dimensional images of the immunohistochemically stained and optically cleared whole-mount mouse lung specimens were acquired using fluorescent confocal laser scanning microscopy. Image processing allowing visualization of *Aspergillus* fungal spores and airways was performed; a 3D model of the object was built. An approach for the assessment of the microparticle distribution in the different regions of the respiratory tract was proposed.

Лазерные технологии широко используют в медицине и биомедицинских исследованиях. Перспективным направлением является оценка распределение лекарственных препаратов и патогенов в легких с использованием флуоресцентной конфокальной лазерной сканирующей микроскопии и животных моделей. Респираторная система млекопитающих представлена воздуховодами различных порядков. Реснитчатый эпителий трахеи и бронхов обеспечивает мукозилиарный клиренс, тогда как в альвеолярном пространстве частицы остаются длительное время [1].

Цель данной работы заключается в оценке доли спор гриба *Aspergillus* – частиц размером 2,5-3 мкм, ассоциированных с различными генерациями нижних дыхательных путей мыши.

Изображения предварительно окрашенных AlexaFluor 568 спор гриба в окраинной AlexaFluor 488 и оптически просветленной доле легкого получали при помощи конфокального микроскопа Zeiss LSM780 с $10 \times$ (NA = 0.3) объективом используя опции “Z-stack” и “Tile scan” в программном обеспечении Zen. В качестве источника возбуждения был использован аргоновый лазер 488 и 568 нм. Преобразование набора Z - проекций в трехмерное изображение и построение 3D модели проводили при помощи программного обеспечения Imaris 9.8 и FIJI.

При помощи функций “Surface” и “Spots” были построены поверхность дыхательного пути и споры гриба. Просвета дыхательных путей заполняли при помощи функций «Dilate», «Fill holes» и «Erode». Далее разбивали поверхность на элементы размером 20 мкм. Элементы объединяли в группы, соответствующие различным генерациям дыхательного пути. С использованием фильтра “Intensity mean” в канале поверхности, споры делили на находящиеся вне и внутри поверхности. Среди последних с использованием того же принципа выделяли споры, ассоциированные с различными генерациями дыхательных путей.



Rис. 1. Споры вне поверхности дыхательного дерева (слева) и внутри дыхательного дерева (справа). Масштаб 300 мкм.

Таким образом, был предложен подход, позволяющий проводить оценку распределения подобных микрочастиц патогенов в различных регионах дыхательных путей.

Список литературы

1. Yang, L., Liu, Q., Kumar, P. [et al.] LungVis 1.0: an automatic AI-powered 3D imaging ecosystem unveils spatial profiling of nanoparticle delivery and acinar migration of lung macrophages // Nat Commun 15, 10138 (2024). doi: 10.1038/s41467-024-54267-1

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-25-00081, <https://rscf.ru/project/25-25-00081/>

А.Е. ШЕПЕЛЕВ^{1,2}, С.А. СОЛОХИН¹, М.Н. ЕРШКОВ¹, А.А. АНТИПОВ^{2,3}, А.Г. ПУТИЛОВ^{2,3}

1 Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, Ковров, Россия

2 Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

3 ООО «ИЛИОС», Радужный, Россия

УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предложен и реализован режим обработки металлических материалов основанный на управлении временной формой воздействующих лазерных импульсов. Экспериментально продемонстрировано, что воздействие на материалы импульсами сложной временной формы позволяет значительно увеличить производительность их обработки по сравнению с воздействием импульсами обычной формы аналогичной энергии.

A.E. SHEPELEV^{1,2}, S.A. SOLOHIN¹, M.N. ERSHKOV¹, A.A. ANTIPOV^{2,3}, A.G. PUTILOV^{2,3}

1 Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russia

2 Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoltoevs, Vladimir, Russia

3 LLC "ILIOS", Raduzhny, Russia

CONTROLLING THE TEMPORAL SHAPE OF IMPACT PULSES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF LASER PROCESSING OF STRUCTURAL DEVICES

A processing mode for metallic materials based on controlling the temporal shape of the acting laser pulses has been proposed and implemented. It has been experimentally demonstrated that exposure of materials to pulses of a complex temporary form can significantly increase the productivity of their processing compared to exposure to pulses of a conventional form of similar energy.

Большим спросом на различных технологических этапах современного производства пользуются различные конструкционные материалы, например, такие как сталь и различные титановые сплавы [1]. Целесообразность и возможность использования определенного материала в конкретных отраслях машиностроения во многом зависит от эффективности технологических операций его обработки. Одним из перспективных современных средств обработки материалов являются лазеры. Несмотря на то, что с помощью лазеров можно получить уникальные технические и экономические результаты обработки, задачи оптимизации режимов и повышения эффективности лазерного воздействия по-прежнему не теряют своей актуальности. Одним из показателей эффективности лазерной обработки является ее высокая производительность, которая непосредственно определяется скоростью обработки. Повышение производительности обработки приводит к уменьшению себестоимости детали, что в свою очередь повышает конкурентоспособность продукции [2]. Это особенно важно в случаях, когда необходимо получить большое количество отверстий [2,3].

В настоящей работе нами предлагается режим обработки листовых металлических образцов, изготовленных из стали и из титанового сплава (толщина от 0,5 мм до 1,5 мм) миллисекундными лазерными импульсами сложной временной формы. Такие импульсы представляют собой комбинацию длинного (~3 мс) высокоэнергетического импульса и короткого (~0,5 мс) высокointенсивного импульса. Таким образом, в основе предлагаемого подхода положен принцип функционального разделения действия лазерного импульса. Воздействие длинного импульса нагревает материал до температуры плавления и формирует ванну расплава. После чего воздействие короткого импульса интенсифицирует удаление расплава из зоны формирования отверстия за счет влияния давления отдачи паров. Эффективность обработки оценивалась по времени сверления сквозных отверстий в исследуемых металлических образцах. Экспериментально продемонстрировано, что воздействие на материалы импульсами сложной временной формы позволяет в несколько раз сократить время сверления сквозных отверстий по сравнению с воздействиями импульсами обычной формы.

Дополнительно нами была предусмотрена возможность модуляции (с частотой от 10 кГц до 200 кГц) короткого импульса в импульсе сложной формы. Воздействие на исследуемые материалы импульсами сложной формы, представляющими собой комбинацию длинного (~3 мс) импульса и пачки модулированных импульсов наносекундной длительности позволило в еще большей степени сократить время сверления сквозных отверстий.

Список литературы

1. Вишнякова Е.В. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2016. №1. С. 49-60.
2. Пятых А.С. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Иркутск. 2018. 181 с.
3. Faraz A., Biermann D., Weinert K. // International journal of machine tools and manufacture. 2009. №15 (49). P. 1185-1196.

А.А. ШКУНДИЧ, Е.С. КОРШАК, М.П. ПАТАПОВИЧ
УО «Белорусская государственная академия связи», Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ С ТРЕБУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

С помощью лазерного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1 проведен послойный анализ многокомпонентных сплавов и изучена возможность созданияnanoструктур на металлической поверхности. Представлен краткий анализ полученных результатов.

A.A. SHKUNDZICH, Y.S. KORSHAK, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

STUDY THE POSSIBILITY OF SYNTHESIS OF NANOPARTICLES WITH THE REQUIRED PROPERTIES ON A METAL SURFACE USING LASER PULSES

Using the LSS-1 laser atomic emission spectrometer, a layer-by-layer analysis of multicomponent alloys was carried out and the possibility of creating nanostructures on a metal surface was studied. A brief analysis of the results obtained is presented.

Развитие методов синтеза наночастиц с требуемыми свойствами является очень важной практической задачей. Следовательно, чтобы изготовить такие структуры, часто приходится использовать лазерный синтез [1, 2]. Его важные достоинства - точный контроль скорости осаждения частиц, а также минимальная степень деструкции образца при импульсной лазерной абляции.

Для изучения состава приповерхностной лазерной плазмы, образованной вблизи поверхности многокомпонентного сплава, использовался лазерный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Спектрометр включает в себя двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемыми энергией и интервалом между импульсами. Частота повторения импульсов достигает 10 Гц. Максимальная энергия излучения каждого из сдвоенных импульсов доходит 80 мДж, а размер сфокусированного пятна равен 50 мкм при длине волны 1064 нм.

Чтобы продемонстрировать возможность создания nanoструктур методом напыления частиц на металлическую поверхность был исследован результат воздействия серии сдвоенных лазерных импульсов на мишень [1]. Для этого в первую очередь необходимо изучить зависимость интенсивности спектральных линий химических элементов от числа воздействующих импульсов. В качестве примера, на рис. 1, приведена зависимость интенсивности линий олова (а), а также цинка и железа (б) от номера лазерных импульсов. Длины волн аналитических линий элементов

- для олова 452, 56 нм; для железа – 438,426 нм; для цинка – 481,205 нм. При этом энергия первого импульса составляла 49 мДж, второго – 46 мДж. Временной интервал между импульсами равнялся 10 мкс. Предварительные эксперименты отразили факт появления линий цинка и железа после первых пятидесяти импульсов. Общее же их число в серии составляло 100.

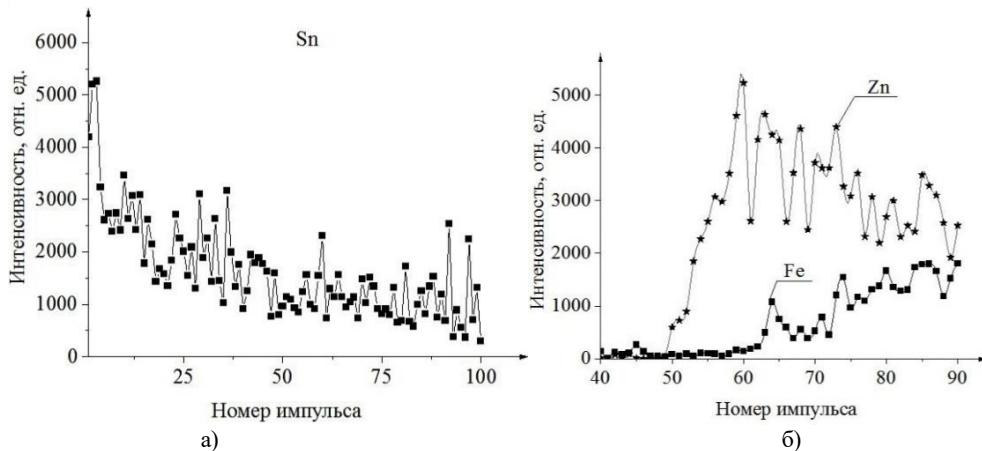


Рис. 1. Зависимость интенсивности линии олова (а) и цинка и железа (б) от номера лазерного импульса

Использование сдвоенных лазерных импульсов позволяет разрабатывать методы управления лазерным факелом и снижать долю высокоэнергичных ионов. Это может помочь в получении однородных сплошных нанопленок неравновесного состава с различными структурными характеристиками.

Список литературы

1. М.П. Патапович, Ж.И. Буйчик // Вестн. Бел. гос. ун-та. 2009. Сер. 1. № 3. С. 14–17.
2. А. Г. Григорьянц. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

П.И. ШУПАН

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ, ОБРАЗОВАННОЙ СДВОЕННЫМИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Представлены результаты синтеза наночастиц никеля в лазерной плазме образованной сдвоенными лазерными импульсами наносекундной длительности на длине волны 1064 нм. Показано, что синтезированные наночастицы обладают большей сферичностью, имеют более узкое размерное распределение. Производительность синтеза в 3 раза большая по сравнению с синтезом одиночными лазерными импульсами с одинаковой энергией.

P.I. SHUPAN

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

SYNTHESIS OF NICKEL NANOPARTICLES IN LASER PLASMA PRODUCED BY DOUBLE NANOSECOND LASER PULSES

The results of the synthesis of nickel nanoparticles in laser plasma formed by double laser pulses of nanosecond duration at a wavelength of 1064 nm are presented. It is shown that the synthesized nanoparticles have greater sphericity and a narrower size distribution. The productivity of the synthesis is 3 times greater compared to the synthesis by single laser pulses with the same energy.

Перспективы широкого применения наноматериалов стимулируют разработку новых методов их получения. Одним из относительно новых методов является синтез наночастиц в плазме на стадии ее рекомбинации [1-2]. Плазма может формироваться различными способами. Одним из них, позволяющих управлять размерным распределением и морфологией синтезированных наночастиц, является синтез в лазерно-эмиссионной плазме в среде инертных газов высокого давления или в жидкостях [3-4]. При синтезе в жидкостях получаются наносупензии. Основной проблемой при синтезе наночастиц в лазерной плазме в жидкости является разбрзгивание жидкости после действия лазерного импульса. Это приводит к тому, что работать с частотами следования лазерных импульсов большими 1 Гц проблематично. Для того, чтобы повысить частоту следования лазерных импульсов необходимо снижать их энергию, однако в этом случае падает производительность синтеза.

Еще в работе [5] показано, что при использовании цугов лазерных импульсов значительно увеличивается скорость лазерной резки по сравнению с одиночными импульсами. В работах [6-7] показан значительный рост выноса материала мишени и рост интенсивности излучения лазерной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. В этой связи в настоящей работе предложено использовать сдвоенные лазерные импульсы для синтеза наночастиц. Эксперименты проводились с использованием YAG:Nd³⁺-лазера, с длительностью импульсов излучения ~15 нс по полувысоте, разработанного в институте физики НАН Беларусь [8]. Лазер генерировал сдвоенные импульсы, разделенные регулируемым в диапазоне 1-300 мкс межимпульсным интервалом. Энергия лазерного излучения в каждом канале могла изменяться от 10 мДж до 30 мДж. Исследование морфологии и размерных распределений полученных наночастиц проводилось на атомно-силовом микроскопе NT-206.

Анализ АСМ-изображений показывает, что в лазерной плазме синтезируются наночастицы преимущественно правильной формы. Наблюдаются сферообразные и конусообразные наночастицы. В поле сканирования АСМ микроскопа частицы расположены не системно. Наличие частиц субмикронного уровня не установлено. Наблюдаются скопления наночастиц и отдельные конгломераты, образованные из наночастиц. Основное количество наночастиц расположено в размерном диапазоне 0-60 нм. С ростом плотности мощности лазерного излучения количество синтезированных наночастиц возрастает. Значительных изменений морфологии наночастиц при этом не установлено. Сравнивая наночастицы никеля, синтезированные в лазерной плазме, образованной сдвоенными лазерными импульсами, с наночастицами никеля, синтезированными в лазерной плазме, образованной одиночными лазерными импульсами, следует что они обладают схожей морфологией, однако имеют большую сферичность и более узкое размерное распределение и значительно большее их количество (~3 раза).

Список литературы

1. Макаров Г.Н. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 673–718.
2. Лещик С.Д., Зноско К.Ф., Сергиенко И.Г., Серенко М.Ю. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т. 14, № 2. С. 84-87.
3. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 2. С. 103-115.
4. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2023. Т. 13, № 1. С. 116-132.
5. Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу Я. И др. // Взаимодействие лазерного излучения с металлами. 1988. М: Наука, 538 с.
6. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2021. Т. 11, № 1. С. 94-106.
7. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 3. С. 100-113.
8. Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Григута В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2018. Т. 8, № 2. С. 101–110.

П.И. ШУПАН, С.Д. ЛЕЩИК

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ В ИНЖЕКТИРУЕМОЙ В ЖИДКОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Представлены результаты синтеза наночастиц в инжектируемой в жидкость лазерной плазме, образованной на поверхности твердофазного материала, расположенного в газовой среде. Методами АСМ микроскопии показано, что синтезированные наночастицы обладают более узкими размерными распределениями (никель, графит) с максимумом в области 20-40 нм.

P.I. SHUPAN, S.D. LESHCHYK

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

SYNTHESIS OF NANOPARTICLES IN LASER PLASMA INJECTED INTO A LIQUID

The results of nanoparticle synthesis in laser plasma injected into liquid, formed on the surface of solid-phase material located in a gas medium, are presented. AFM microscopy methods showed that the synthesized nanoparticles have narrower size distributions (nickel, graphite) with a maximum in the region of 20-40 nm.

Уникальные свойства наночастиц лежат в основе новых материалов и новых технологий. Для широкого применения наночастиц необходима разработка методов их производства, позволяющих управлять их размерными характеристиками и свойствами, а также получать наночастицы сложного состава (сплавов, биметаллов, карбидов, нитридов, полупроводников и т.д.). Хотя разработанные к настоящему времени методы получения наночастиц достаточно разнообразны, однако особого внимания заслуживают так называемые диспергационно–конденсационные методы [1-2]. На первом этапе происходит дробление твердофазного образца на атомы, молекулы или ионы, а на втором этапе – сборка из них (конденсация, синтез) наночастиц. Одним из таких методов получения наночастиц является импульсная лазерная абляция твердофазных материалов в газах и жидкостях [3-4]. Особенностью метода является возможность управления технологическим процессом и свойствами полученных наночастиц. Жидкость выступает в этом случае в качестве среды поглощающей синтезированные наночастицы.

Использование классической схемы синтеза наночастиц в аблиционной лазерной плазме в жидкости имеет ограничения по производительности обусловленные разбрзгиванием жидкости после действия лазерного импульса, а также нарушением остроты фокусировки лазерного излучения на мишени, находящейся в жидкости, вследствие ее движения за счет акустических волн, возникающих после действия каждого импульса [6-7]. В работах [7-8] показан значительный рост выноса материала мишени при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. Используемые энергии лазерного излучения при этом составляют в лучшем случае десятки мДж.

Для повышения производительности метода в настоящей работе предложено использовать инъекцию лазерной плазмы, образованной в воздухе в жидкость (этанол, воду и др.). Эксперименты проводились с использованием YAG:Nd³⁺-лазера LS-2147, разработанного в институте физики НАН Беларуси. Пластина диспергируемого твердофазного материала располагается над поверхностью жидкости под углом 45 градусов. Сфокусированное лазерное излучение, оптическая ось которого параллельна поверхности жидкости, воздействует на диспергируемый материал. Образовавшийся плазменный факел распространяется перпендикулярно поверхности пластины и инжектируется в жидкость. В этом случае синтез наночастиц происходит в расширяющейся лазерной плазме в газовой среде, а аккумулирование их – в жидкости. АСМ микроскопия синтезированных наночастиц (никель, графит, медь) показывает, что их размерные распределения являются более узкими, а их максимумы смешены в сторону наночастиц меньших размеров (20-40 нм). Это обусловлено изменением кинетики формирования наночастиц по сравнению с традиционной схемой. Их синтез происходит при более низком давлении в среде плазменного факела, что приводит к снижению частоты элементарных столкновений в плазме, росту числа центров конденсации и снижению размеров наночастиц. Особенностью этого метода синтеза наночастиц является возможность использования более высоких энергий лазерного импульса, а также получение более «чистых» (не окисленных) наночастиц при расположении кюветы с жидкостью и диспергируемым материалом в среде гелия или аргона.

Список литературы

1. Макаров Г.Н. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 673–718.
2. Гончарова Д.А., Лапин И.Н., Савельев Е.С., Светличный В.А. // Известия ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60, № 7. С. 99-106.
3. Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Григуть В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2018. Т. 8, № 2. С. 101–110.
4. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.В. // Журнал прикладной спектроск.. 2018. Т. 85, №2. С.285-292.
5. Лещик С.Д., Зноско К.Ф., Сергиенко И.Г., Серенко М.Ю. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т. 14, № 2. С. 84-87.
6. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И. и другие // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83, № 5. С. 724–730.
7. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 3. С. 100-113.
8. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. і кір.. 2021. Т. 11, № 1. С. 94-106.

А.В. ЩУКО, Н.Х. ЧИНЬ, М.П. ПАТАПОВИЧ
УО «Белорусская государственная академия связи», Минск, Республика Беларусь

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В БИООБРАЗЦАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСЫХАНИЯ МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Изучено влияние температуры высыхания образцов на распространение химических элементов в высохших каплях биологических жидкостей. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. Представлено краткое обсуждение результатов.

A.V. SHCHUKO, N.H. TRINH, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

STUDY OF DISTRIBUTION OF ELEMENTS IN BIO-SAMPLES DEPENDING ON DRYING TEMPERATURE BY ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

The effect of sample drying temperature on the distribution of chemical elements in dried droplets of biological fluids was studied. The experiments were carried out using a laser double-pulse atomic emission spectrometer LSS-1. A brief discussion of the results is presented.

При высыхании капли биологической жидкости на плоской поверхности протекает множество разнообразных процессов различной природы. Например, увеличение температуры будет увеличивать подвижность солей в растворе и скорость испарения воды. Следовательно, необходимо оценить влияние температуры на распространение макро- и микроэлементов по диаметру капли жидкости [1, 2].

Для изучения зависимости интенсивности спектральных линий химических элементов от положения точки на поверхности биообъекта использовался лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1, изготовленный СП «ЛОТИС ТИИ». В качестве источника возбуждения плазмы здесь выступает двухимпульсный неодимовый лазер с возможностью регулирования временного интервала между импульсами [2]. При проведении исследования анализировались результаты воздействия лазерных импульсов на поверхность модельного образца с целью дальнейшего определения концентрации элементов при различной температуре высыхания образцов. При этом энергия импульсов находилась в диапазоне от 20 до 60 мДж, задержка между импульсами составляла 8 мкс. В качестве примера, на рис. 1, проведен внешний вид изучаемого объекта (а), а также распределение алюминия и магния по поверхности (б), когда температура составила 40°. Длины аналитических линий составляли: для алюминия - 396,152 нм; для магния - 383,829 нм.

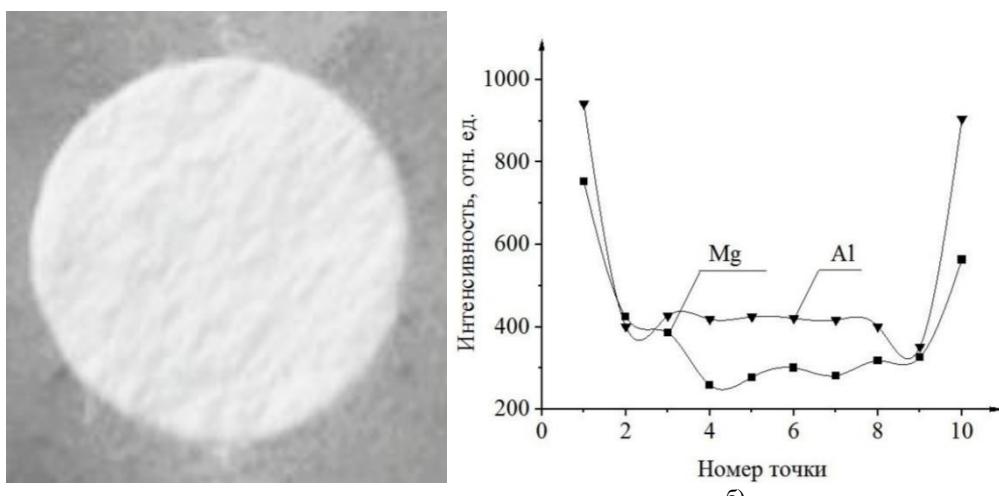


Рис. 1. Внешний вид исследуемого образца (а) и зависимость интенсивности линий алюминия и магния от номера точки (б)
Таким образом, повышение температуры высыхания способно увеличить диаметр пятна с распределенными элементами. При этом скорость испарения также увеличивается, а время сушки уменьшается. Данный подход может быть в дальнейшем использован для создания методик изучения количественного состава биообъектов.

Список литературы

1. М.П. Патапович, Ж.И. Булойчик // Вестн. Бел. гос. ун-та. 2009. Сер. 1. № 3. С. 14–17.
2. Чинь Н.Х., И.Д. Пашковская, Ж.И. Булойчик, А.П. Зажогин // Вестн. Бел. гос. ун-та. 2012. Сер. 1. № 1. С. 31–34.

Е. В. БОРИСОВ, И. В. ГАЛУШКА, А. А. КОЗЫРЕВ, М. А. КОПЁНКИН, О. В. КОRENЧЕНКО,
В. А. ПАНАРИН, С. Н. СОКОЛОВ, М. Ю. СТАРЫНИН, Л. И. ШЕСТАК
ООО «НПП «Инжект», Россия, 410033 Саратов, ул. Элмашевская 3а

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены новые виды перспективных лазерных изделий фотоники, перспективные для применения в системах диодной накачки высокоэнергетичных лазерных систем, и в лазерных технологиях обработки материалов – термоупрочнении, легировании, наплавке, лазерной пайке, автоматизированной выкладке термопластичной ленты препрега с локальным нагревом поверхности мощным диодным лазером и др.

E. V. BORISOV, I. V. GALUSHKA, A. A. KOZYREV, M. A. KOPENKIN, O. V. KORENCHENKO,
V. A. PANARIN, S. N. SOKOLOV, M. Yu. STARYNNIN, L. I. SHESTAK
INJECT RME LLC, Russia, 410033 Saratov, Elmashevskaya st. 3a

ADVANCED LASER AND OPTOELECTRONIC COMPONENTS AND THEIR APPLICATIONS

New types of prospective laser photonics products are considered, promising for use in diode pumping systems of high-energy laser systems and in laser technologies for material processing - thermal hardening, alloying, surfacing, laser soldering, automated laying of thermoplastic prepreg tape with local heating of the surface by a powerful diode laser etc.

Сообщается о новых изделиях, разработанных и выпускаемых в ООО НПП «Инжект». Лазерные диодные (ЛД) модули с выводом излучения через световод:

с выходной мощностью излучения 500 Вт в непрерывном режиме работы с длиной волны лазерного излучения 940 нм, диаметром сердцевины выходного световода 800 мкм (NA=0,22) для накачки твердотельных лазеров и технологических применений;

лазерный диодный (ЛД) модуль с узкой шириной спектра лазерного излучения для спин-обменной оптической накачки (SEOP) атомов Rb с последующим спиновым обменом с изотопом ^{129}Xe (длина волны максимума спектра лазерного излучения: 794,8 нм, мощность излучения: 50 Вт; ширина огибающей спектра лазерного излучение: не более 0,1 нм);

с выходной мощностью излучения 400 Вт в непрерывном режиме работы с длиной волны лазерного излучения 976 нм, диаметром сердцевины выходного световода 200 мкм (NA=0,22) для накачки волоконных лазеров и технологических применений;

Наборные ЛД решетки квазинепрерывного режима работы:

с широким спектром излучения 800-811 нм, с пиковой выходной мощностью оптического излучения до 2000 Вт, режим работы QCW: 300 мкс, 10 Гц, для накачки DPSS лазеров атермальной конструкции;

с пиковой выходной мощностью излучения от 20 до 200 кВт, длиной волны излучения 940 нм (длительность импульса излучения – до 2 мс, 10 Гц, расходимость коллимированного лазерного пучка (FWHM) – 14x2 градуса) для накачки высокоэнергетичных Yb лазеров;

импульсная ЛД решетка SLM12-940-50000-Pulse-HD – 50 кВт, 940 нм, 20 нс, 10 кГц.

Микрооптические элементы и гомогенизатор лазерных лучей на основе двустороннего массива перпендикулярно расположенных цилиндрических микролинз, изготовленных из оптического кварцевого стекла, с апертурой 90x90 мм и пропусканием 99%;

Полупроводниковой технологический лазер высокой мощности - модель PLD-6 с выходной мощностью лазерного излучения до 6 кВт в непрерывном режиме работы (размер пятна лазерного воздействия 22x2 мм) применяется при лазерной обработке материалов - термоупрочнении, легировании, наплавке и др.

Приведены результаты экспериментальных работ по автоматизированной выкладке ленты препрега из термопластичных ПКМ с локальным нагревом поверхности мощным диодным лазером – технологии, перспективной для массового производства изделий из термопластичных полимерных композитных материалов.

Разработан опытный образец установки лазерной пайки с выходной мощностью в непрерывном режиме работы от 5 Вт до 80 Вт, работающей в спектральном диапазоне 770-1100 нм, размер пятна лазерного воздействия ~ 400 мкм. Установка имеет автоматизированную систему подачи припоя, пилотный лазер и предназначена для локальной пайки радиоэлектронных компонентов.

Д.В. БАДИКОВ¹, А.А. ИОНИН², М.В. ИОНИН², И.О. КИНЯЕВСКИЙ², Ю.М. КЛИМАЧЕВ², А.М. САГИТОВА², Е.П. ФЕДОРОВА³

¹Кубанский государственный университет, Краснодар

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ СО-ЛАЗЕРА В КРИСТАЛЛЕ BaHgGeSe₄

Приведены результаты экспериментов по генерации суммарных частот излучения СО-лазера с МДР в нелинейном кристалле BaHgGeSe₄. Произведена оценка эффективной нелинейности данного кристалла через соотношение измеренных эффективностей в кристаллах BaHgGeSe₄ и GaSe.

D.V. BADIKOV¹, A.A. IONIN², M.V. IONIN², I.O. KINYAEVSKIY², YU.M. KLIMACHEV², A.M. SAGITOVA², E.P. FEDOROV³

¹Kuban State University, Krasnodar

²P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

³National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

SUM-FREQUENCY GENERATION OF Q-SWITCHED CO LASER IN BaHgGeSe₄ CRYSTAL

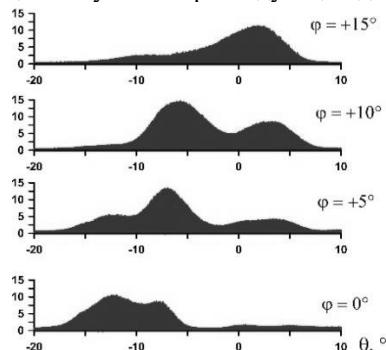
Presents the result of experiments on the sum-frequency generation of Q-switched CO laser radiation in BaHgGeSe₄ nonlinear crystal. The effective nonlinearity of BaHgGeSe₄ crystal is estimated through the ratio of the measured efficiencies in BaHgGeSe₄ and GaSe crystals.

В настоящее время активно ведется поиск и исследование новых высокоеффективных нелинейных кристаллов для преобразования лазерного излучения среднего ИК-диапазона. Недавно группой китайских ученых был предложен новый двухосный нелинейный кристалл BaHgGeSe₄ [1]. Образцы данного кристалла удалось вырастить в Кубанском государственном университете группой Д.В. Бадикова. Целью работы является экспериментальное исследование характеристик нового нелинейного материала BaHgGeSe₄, определение его эффективной нелинейности по сравнению с нелинейным кристаллом GaSe.

Схема экспериментальной установки аналогична схеме в работе [2]. Излучение лазера фокусировалось линзой ($f = 115$ мм) в нелинейный кристалл BaHgGeSe₄, который был установлен на моторизованный поворотный столик с точностью контроля поворота угла θ вокруг вертикальной оси 0.9° и угла φ 0.2° (рис. 1). В эксперименте использовался СО-лазер, работавший в неселективном режиме генерации излучения при модуляции добротности резонатора (МДР).



Рис. 1. Фото нелинейного кристалла BaHgGeSe₄



При сканировании угла θ наблюдались максимумы сигнала излучения ГСЧ (рис. 2). Для положения $\varphi=+10^\circ$ мощность генерации суммарных частот (ГСЧ) составила 3 ± 1 мкВт при 42 мВт мощности СО лазера. Это соответствует эффективности преобразования $\sim 10^4$. Показатель преломления кристалла BaHgGeSe₄ был рассчитан с использованием экспериментально полученных коэффициентов Селлмейера [3]. Эффективная нелинейность кристалла BaHgGeSe₄ была оценена благодаря сравнению измеренных эффективностей преобразования ГСЧ в кристаллах BaHgGeSe₄ и GaSe [4]. Значение эффективной нелинейности для ГСЧ излучения СО-лазера в кристалле BaHgGeSe₄ составило 23 ± 3 пМ/В.

Список литературы

1. Guo Y. et al. //Chemistry of Materials. 2019. Т. 31. №.8.Р.3034-3040.
2. Киняевский И.О. и др. // Квантовая электроника.2023. Т. 53. №. 8.С. 631-635.
3. Badikov D.V. (private communications)
4. Badikov D. V. et al. // Optical and Quantum Electronics. 2018. Т.50. Р.1-9.

М.В. Винокуров, Р.А. Хабибуллин

Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Проведено моделирование терагерцовых квантово-каскадных лазеров с распределенной обратной связью (РОС) первого порядка, реализованной за счет гофрирования боковых границ двойного металлического волновода. Исследовано влияние периода РОС на модовый состав спектров излучения. На основе решения системы скоростных уравнений продемонстрированы резонансные моды для различных пространственных периодов РОС.

M.V. Vinokurov, R.A. Khabibullin

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

SIMULATION OF TERAHERTZ QUANTUM-CASCADE LASERS WITH FIRST-ORDER DISTRIBUTED FEEDBACK

Simulation of terahertz quantum cascade lasers with first-order distributed feedback (DFB) implemented by corrugating the lateral boundaries of a double metal waveguide is carried out. The influence of the DFB period on the mode composition of the emission spectra is studied. Based on the solution of a system of rate equations, resonant modes for different spatial DFB periods are demonstrated.

Интерес к терагерцовому диапазону обусловлен широкими возможностями в применении, особенно в области спектрометрии. Однако помимо создания квантово-каскадных лазеров, работающих в данном диапазоне, возникает необходимость одномодовой генерации. Одним из способов, позволяющих достигнуть одномодовую генерацию, является введение дополнительных потерь, является использование распределенной обратной связи (РОС).

В работе рассматривается двойной металлический волновод, длина которого составляет 1мм, а наибольшая ширина 59мкм. Рассматривается различный период гофра: 14.609мкм, 19.715мкм и 24.465мкм. Параметры волновода подбирались так, чтобы его длина не менялась.

Общий вид скоростных уравнений для числа фотонов: $\frac{dS_m}{dt} = [G(N, \lambda_m) - \gamma_m]S_m + \frac{R_{sp}}{V_{act}}$, где потери γ_m выражены в обратных секундах. Связь с потерями, выраженным в обратных сантиметрах, такова: $\gamma_m = V_{group} * \alpha_m$. Будем считать, что дисперсия пренебрежимо мала, тогда групповая скорость есть скорость света, то есть $\gamma_m = c * \alpha_m$. Усиление можно найти по формуле: $g_0 = 2k_0 n_i$, где n_i – мнимая часть коэффициента преломления. При помощи Comsol были найдены собственные моды лазера для двух случаев: в среде есть усиление и усиление в среде отсутствует. Интерес представляет не только действительная часть собственной моды, отвечающая частоте колебаний, но и мнимая, характеризующая потери в среде. Зная потери, получаем пороговое усиление среды [1]. Зависимость порогового усиления от моды сравнивалась с результатами статьи [2]. Далее при помощи Python решается система скоростных уравнений, в которую подставляются вычисленные при помощи Comsol параметры. Разрешив систему, мы получаем зависимость числа фотонов от времени, что позволяет нам вычислить мощность каждой моды в отдельности. Система скоростных уравнений составляется по аналогии с [3]. Результатом проделанных вычислений является спектр лазера. Для пространственного периода гофра 14.6 мкм спектр генерации представлен на Рис. 1. Видно, что в спектре есть одна доминирующая мода, мощность которой почти в 10 раз больше мощности соседних мод. Таким образом, использование РОС для ТГц квантово-каскадных лазеров позволяет эффективно подавлять боковые моды и достигать одномодовой генерации.

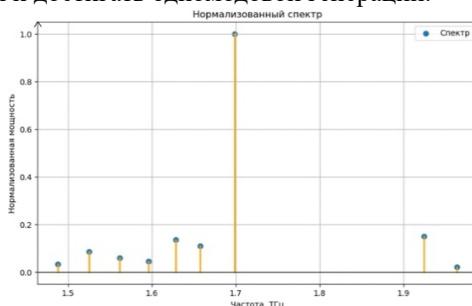


Рис. 1 Спектр терагерцового квантово-каскадного лазера с РОС первого порядка (период РОС – 14.6 мкм).

Список литературы

1. Wienold, M., Röben, B., Schrottke et al. // Optics Express. 2014. 22(3), 334
2. Williams, B. S., Kumar, S., Hu, Q., & Reno, J. L. // Optics Letters. 2005. 30(21), 2909.
3. Petitjean, Y., Destic, F., Mollier, J., & Sirtori, C. () // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2010. 17(1), 22-29.

Н.В. ГРЕЧИХИН, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С УЧЕТОМ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Проведено моделирование теплового воздействия наносекундного лазерного излучения на алюминий с учетом жидкой фазы. Построенная модель позволяет предсказывать форму кратеров, получающихся в результате воздействия одиночных импульсов. Показана динамика образования кратера и наплыва на поверхности при воздействии наносекундного лазерного излучения. Построен график зависимости высоты наплыва на поверхности алюминия в зависимости от энергии в импульсе.

N.V. GRECHIKHIN, A.S. SHCHEKIN, V.N. PETROVSKIY
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

COMPUTATIONAL MODELLING OF THERMAL EFFECT OF SINGLE NANOSECOND LASER PULSES TAKING INTO ACCOUNT THE LIQUID PHASE

The thermal effect of nanosecond laser radiation on aluminum is simulated taking into account the liquid phase. The constructed model allows predicting the shape of craters resulting from the action of single pulses. The dynamics of crater formation and buildup on the surface under the action of nanosecond laser radiation is shown. A graph of the buildup height on the aluminum surface as a function of pulse energy is constructed.

В лазерных технологиях моделирование позволяет предсказывать температурные поля в материале, геометрию обрабатываемой поверхности, а также получать параметры излучения для получения определенных топологических параметров обрабатываемых образцов. Особое значение имеет моделирование воздействия наносекундного лазерного излучения, поскольку лазеры данного типа широко используются для микрообработки [1]. Особенностью наносекундного воздействия на металл является образование наплыва на поверхности из-за выплеска жидкой фазы. Для моделирования лазерного воздействия с образованием наплыва необходимо учитывать в модели жидкую фазу, что в свою очередь требует учета многих термических процессов и построение мультифизических моделей.

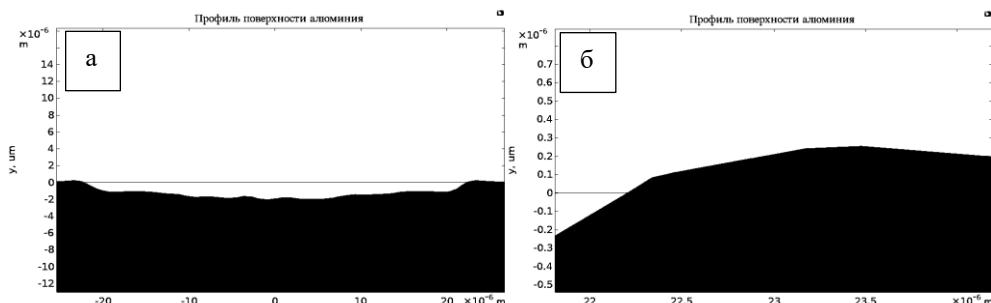


Рис. 1 - Профиль поверхности алюминия в момент времени $t = 50$ нс: а) общий вид кратера, б) приближенный вид границы кратера с образованием наплыва

Для учета испарения, а также необходимости отслеживать границу жидкость/тело – окружающая среда в работе был использован метод линий уровня (level-set), который заключается в использовании функции $\Phi(x, y, t)$, которая определена во всей модели, и которая принимает нулевое значение в алюминии и единичное в воздухе. Значение $\Phi(x, y, t) = 0,5$ отвечает границе раздела алюминий – воздух. Основное уравнение, которому подчиняется $\Phi(x, y, t)$ в простейшем случае выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \Phi + \gamma \cdot \nabla [\Phi(1 - \Phi) - \varepsilon \nabla \Phi] = 0, \quad (1)$$

где ε и γ – два параметра, отвечающих за размер области, в которой значение функции Φ плавно изменяется от нуля до единицы и характерную скорость ламинарного потока соответственно.

Поверхность алюминия после воздействия импульса длительность 50 нс изображена на рисунке 1. Во время действия лазерного импульса происходит постепенное плавление, испарение (образование кратера) и выталкивание давлением отдачи жидкой фазы, что ведет к образованию наплыва. Также была определена зависимость высоты наплыва на поверхности алюминия от плотности мощности лазерного излучения. При увеличении плотности мощности высота наплыва увеличивается, что согласуется с тем, что при увеличении плотности мощности лазерного излучения давление паров отдачи, действующих на расплавленный материал возрастает.

Список литературы

1. Sugioka K., Michael M., Pique A. Laser Precision Microfabrication // Book. 2010. 311–335 p.

Е.С. ЕРМИЛОВА^{1,2}, О.И. БАЙЦАЕВА², В.А. АНДРЕЕВА², М.В. МУРАШКИНА³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Москва, Россия

³ГБУЗ Москвы «Городская клиническая больница №31 Департамента здравоохранения Москвы», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОНА БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ТУЛИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА (TFL) С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1,94 МКМ ДЛЯ ЭНДОСКОПИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ «СЛОЖНОГО» ХОЛЕДОХОЛИТИАЗА

Проведен эксперимент *in vitro* для разработки первых клинических рекомендаций по безопасному применению тулиевого волоконного лазера Urolase+ Premium производства ООО НТО «ИРЭ-Полюс» при контактной лазерной литотрипсии в лечении сложного холедохолитиаза. Установлено, что при постоянном ирригационном потоке 60 мл/мин все режимы с максимальной средней мощностью 70 Вт находятся в безопасном диапазоне. При переменном потоке необходимо чаще отжимать педаль лазера и обеспечивать ирригацию для поддержания оптимальной температуры.

E.S. ERMILLOVA^{1,2}, O.I. BAYTSAEVA², V.A. ANDREEVA², M.V. MURASHKINA³

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²LLC NTO "IRE Polus", Moscow, Russia

³Municipal Clinical Hospital No. 31 of Moscow Department of Health, Moscow, Russia;

INVESTIGATION OF THE RANGE OF SAFE MODES OF THULIUM FIBER LASER (TFL) WITH A WAVELENGTH OF 1.94 MICRONS FOR ENDOSCOPIC TREATMENT OF COMPLEX CHOLEDOCHOLITHIASIS

An *in vitro* experiment was conducted to develop the first clinical recommendations for the safe use of the Urolase+ Premium thulium fiber laser manufactured by ООО НТО ИRE-Polus in contact laser lithotripsy in the treatment of complex choledocholithiasis. It was found that with a constant irrigation flow of 60 ml/min, all modes with a maximum average power of 70 W are in the safe range. With a variable flow, it is necessary to press the laser pedal more often and provide irrigation to maintain the optimal temperature.

В последние десятилетия прослеживается рост случаев желчекаменной болезни, связанной с образованием конкрементов в желчевыводящих путях. «Сложный» холедохолитиаз характеризуется неэффективностью стандартных эндоскопических методов лечения из-за крупных (более 1,5 см) и неправильно сформированных камней, а также анатомических изменений билиарного тракта. В таких случаях применяется контактная внутрипротоковая лазерная литотрипсия — малоинвазивный и эффективный метод, особенно когда эндоскопическое извлечение невозможно. Желчные камни имеют пористую структуру и находятся в водной среде, что делает двухмикронное лазерное излучение (1,9-2,1 мкм), совпадающее с пиком поглощения воды, подходящим для лечения.

При лазерном воздействии внутри желчного протока важно избежать гипертермии слизистой оболочки. Для этого проведен эксперимент, целью которого было определить безопасный диапазон мощностей лазера при контактной литотрипсии. Измерялась температура водной среды в силиконовой модели протока с помощью термопар К-типа, расположенных в нескольких точках (рис. 1а). Это позволило исследовать нагрев вблизи торца волокна и дальнейшее распределение температурного поля от центра в бок. Лазерная энергия была фиксирована на уровне 0,5 Дж, а основным объектом исследования стала зависимость изменения температуры ирригационной жидкости от мощности лазера. На графике ниже (рис. 1б) показана общая тенденция изменения температуры от времени лазерной эмиссии одновременно для трех термопар в случае измерения при постоянном потоке поступающей жидкости для 30 Вт.

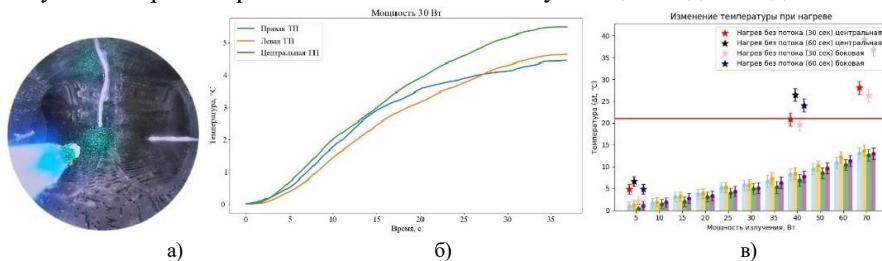


Рис. 1. а) Эндоскопический вид расположения термопар внутри модели протока, б) График зависимости изменения температуры от времени для трех термопар для 30 Вт с ирригацией, в) Столбчатая диаграмма, отражающая зависимость нагрева жидкости внутри протока от подаваемой мощности в присутствии ирригации и без нее для обеих термопар

Температура физраствора для ирригации при литотрипсии составляет 22 °C, а критическая температура для необратимых изменений слизистой — 43 °C, что устанавливает пороговое значение нагрева в 21 °C. Анализ столбчатой диаграммы (рис. 1в) показывает, что при постоянном ирригационном потоке 60 мл/мин все режимы лазера TFL Urolase+ Premium безопасны. При переменном потоке необходимо чаще прекращать лазерную эмиссию и обеспечивать ирригацию для поддержания оптимальной температуры.

Х.САЛЕХ¹, Ю.А.КОНИН², А.А.ПЕТРОВ¹

¹ Институт лазерных технологий, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗОН В ОБЪЕМЕ СТЕКЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Явление движущегося оптического разряда (fiber fuse effect), индуцированное в объеме стекла с помощью наносекундных лазерных импульсов, обладает уникальными свойствами и приводит к образованию дефектов с характерной структурой. С помощью высокоскоростной камеры были детально изучены динамические процессы, включая скорость распространения плазмы и факторы, влияющие на нее. Продемонстрирована возможность управления формированием сложных структур в объеме стекла с помощью этого явления.

H. SALEH¹, Y.A. KONIN², A.A. PETROV¹

¹ Institute of Laser Technologies, ITMO University, St. Petersburg, Russia

² Perm State National Research University, Perm, Russia

INVESTIGATION OF PLASMA MOTION DURING THE FIBER FUSE EFFECT AND MODIFIED ZONES IN BULK GLASS UNDER NANOSECOND LASER PULSES

The fiber fuse effect induced in bulk glass using nanosecond laser pulses exhibits distinctive behaviors and generates defects with unique structural characteristics. Through fast-camera monitoring, the dynamics of the process, including plasma propagation speed and the influencing factors, were thoroughly analyzed. The ability to control the formation of complex structures within the bulk glass through this phenomenon was demonstrated.

The CW-LBI (continuous-wave laser backside irradiation) method uses CW laser light to modify the refractive index in bulk glass without causing cracks, enabling the creation of waveguides and etchable channels. The process typically begins by directing a CW laser onto an absorber placed behind the glass sample, generating a heated zone and initiates a plasma spark that travels toward the light source. As the plasma propagates, it modifies the material along its path, leaving a structured trace. The process continues until beam defocusing reduces the laser power density below the threshold [1].

Applying the same process with nanosecond laser pulses has been shown to be feasible [2], offering a more controllable approach with distinct characteristics and potential applications. This study aims to deepen understanding of this method by analyzing its behavior and exploring experimental conditions to achieve complex structures.

In this study, an IPG YLPM-1 Pulsed Fiber Laser (1064 nm, 20 W, 200 ns pulse duration, 10–1000 kHz repetition rate) was used. A scanning system with Galvano mirrors and an F-theta lens (160 mm focal length) focused the laser onto a stainless-steel foil (AISI 314, 100 µm) placed between an N-BK7 glass sample (3 × 2 × 1.1 cm) and a glass slide, secured with a jig. This setup initiated the fiber fuse effect. Plasma propagation was monitored using an AOS X-EMA fast camera (1280 × 75 pixels, 10,000 fps, 100 µs shutter time).

By scanning the laser source along a line at a specific speed and repetition rate, we were able to direct the plasma spark in various directions. Maintaining the laser irradiation for approximately 700 ms was sufficient to initiate the effect, after which the plasma could be guided for distances of up to 500 µm from the starting point. The fast camera monitoring has revealed how the plasma changes its shape and speed along its track, reaching a maximum speed of 0.2 m/s.

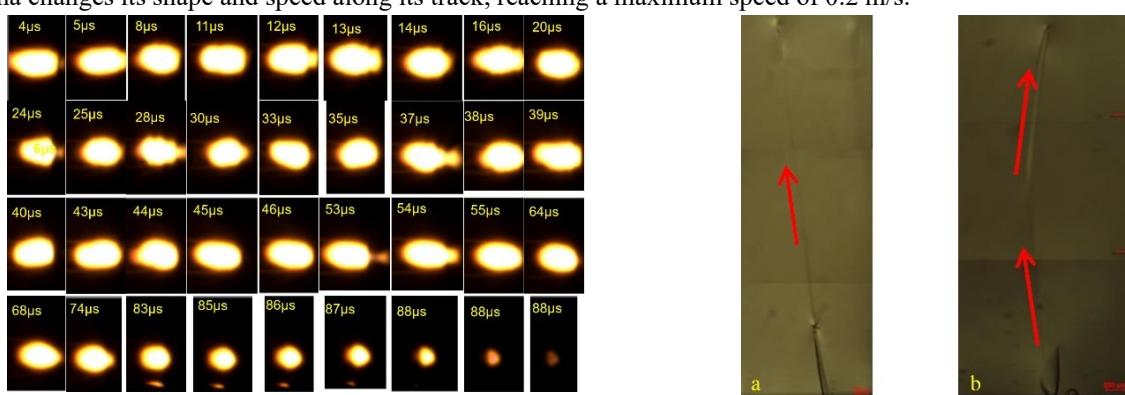


Fig. 1. Left: Time lapse of the plasma propagation. Right: Defects resulted from guiding the plasma in 1 (a) and 2 (b) directions

List of references

1. Sato, H. Hidai, S. Matsusaka, et al., "Void formation in bulk silica glass by fiber fuse induced with a focused laser beam," Appl. Phys. A, vol. 127, p. 894, 2021.
2. Saleh H., Konin Y.A., Petrov A.A. Glass modification by backside irradiation using nano-second laser pulses//Proceedings - International Conference Laser Optics 2024, ICLO 2024, 2024, pp. 346

А.А. СВИРИДОВА, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ НАНОСЕКУНДНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Представлено исследование влияния параметров наносекундного лазерного излучения на качество поверхности и степень metallизации алюминитридной керамики для формирования алюминиевого проводящего слоя с наименьшим сопротивлением. Проанализированы зависимости сопротивления, шероховатости поверхности и толщины полученного проводящего слоя от плотности энергии, длительности и перекрытия импульсов. Получена температурная зависимость сопротивления при охлаждении до температуры жидкого азота, проведён анализ нанесенного методом магнетронного напыления медного покрытия и исследована адгезионная прочность соединений медного, алюминиевого слоя и подложки AlN с помощью «скретч-тестера».

A.A. SVIRIDOVA, A.S. SHCHEKIN, V. N. PETROVSKIY

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

METALLIZATION OF ALUMINUM NITRIDE BY NANOSECOND PULSED LASER RADIATION

The study examined the effects of nanosecond pulse laser radiation parameters on the quality of the metallized surface and the degree of metallization of AlN ceramics in order to form the lowest resistance conductive layer. The dependences of the resistance, surface roughness, and thickness of the resulting conductive layer on the laser fluence, duration, and overlap of pulses are analyzed. The temperature dependence of the resistance during cooling to the temperature of liquid nitrogen is obtained, the analysis of the copper coating applied by magnetron sputtering is carried out, and the adhesive strength of the compounds of the copper, aluminum layers and the AlN substrate is investigated using a scratch tester.

Металлизированные подложки из нитрида алюминия(AlN) играют важную роль в производстве современной микроэлектроники. Металлизацию керамических диэлектрических подложек традиционно выполняют с помощью многоступенчатых и требующих значительных ресурсов методов вакуумного напыления, химико-электролитической металлизации и вжигания проводящих паст. Лазерная обработка – эффективный способ модификации поверхности материала и металлизации AlN, обеспечивающий высокую точность и гибкость управления процессом с контролем качества металлизированной поверхности и степени металлизации [1]. Лазерная металлизация AlN обеспечивает меньшую ширину проводящей дорожки, определяемую параметрами лазерной обработки, и лучшую адгезионную прочность металлизированного слоя и подложки AlN, что способствует упрощению производства металлизированных структур сложной геометрии и меньших размеров, а также эффективному использованию других методов металлизации для получения составного слоя с меньшим значением сопротивления. Метод прямой лазерной металлизации обеспечивает формирование проводящих слоев путем термического воздействия лазерного излучения на диэлектрическую подложку: $\text{AlN} + h\nu \rightarrow \text{Al} + \text{N}$ [2;3].

Целью работы было формирование проводящего слоя на поверхности подложки из нитрида алюминия с минимальным сопротивлением при лазерной обработке наносекундным импульсным лазерным излучением с длиной волны $\lambda=1,064$ мкм с контролем качества поверхности и степени металлизации, изучение свойств медного слоя, нанесённого на модифицированную лазером область методом магнетронного напыления, а также определение адгезионной прочности медного покрытия.

В работе было показано, что сопротивление проводящего слоя обратно пропорционально квадратному корню из длительности импульсов, что связано с пропорциональностью толщины металлизированного слоя толщине прогретого путем теплопроводности слоя, показано наличие оптимальных значений перекрытия импульсов по направлению сканирования (Ox) равного 50% и направлению шага (Oy) равного 96% и 99,7% для длительностей импульсов 200 и 4 нс соответственно. При использовании оптимальных перекрытий импульсов с наибольшей плотностью энергии был сформирован проводящий слой с минимальным сопротивлением, шероховатостью поверхности и максимальной производительностью процесса. В рамках работы был показан металлический характер зависимостей сопротивления от температуры при охлаждении до температуры жидкого азота для металлизированных лазерным излучением с длительностью импульсов 4 нс образцов при трёх значениях плотности энергии с температурным коэффициентом сопротивления для наибольшей исследуемой плотности энергии $\alpha=4,7 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/\text{K}$. Проведён анализ нанесенного методом магнетронного напыления медного покрытия со снижением общего сопротивления в несколько раз и установлено, что корректные измерения адгезионной прочности медного слоя к алюминию при недостаточном количестве алюминия, сформированного в процессе лазерной металлизации, и адгезии медного слоя к подложке из AlN с помощью скретч-тестера невозможны из-за вдавливания металла вглубь керамики, адгезионная прочность медного покрытия к алюминию для металлизированных длительностью 200 нс с наибольшей плотностью энергии импульсов образцов составляет около 15 Н.

Список литературы

1. Sviridova A. A., Shchekin, A. S., Petrovskiy, V. N. and others // Laser Phys Lett. 2024. Vol. 21, № 5. P. 055601.
2. Kozioł P. E., Antończak A. J., Szymczyk P. and others // Appl. Surf. Sci. 2013. Vol. 287. P. 165–171.
3. Yang Q., Yang C., Lv Z. and others // J. Mater. Sci. 2019. Vol. 54, № 22. P. 13874-13882

И.В. ШВАРЦ, А.Х. ГИЛЬМУТДИНОВ

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

В настоящей работе рассматривается способ прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием. Для апробации способа разработан экспериментальный стенд. Для проведения количественного анализа влияния ультразвукового воздействия на микроструктуру нержавеющей стали, разработана программа определения распределения размеров столбчатых дендритов на основе оптических снимков. Сравнительный анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что ультразвуковые колебания приводят к измельчению столбчатой дендритной структуры.

I.V. SHVARTS, A.Kh. GILMUTDINOV

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia

THE ANALYSIS OF THE STAINLESS STEEL MICROSTRUCTURE DURING ULTRASONIC ASSISTED DIRECT METAL DEPOSITION PROCESS

The work presents ultrasonic assisted direct metal deposition process. An experimental set-up has been developed. The program for determining the distribution of columnar dendrite sizes based on optical images of microstructure was developed in order to quantitative analyze the influence of ultrasound on the stainless steel microstructure. A comparative analysis of the results made it possible to conclude that ultrasonic vibrations lead to grinding the columnar dendritic structure.

Несмотря на явные преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными технологиями, есть существуют проблемы, которые могут отрицательно влиять на качество изделий [1]. К этим недостаткам относятся: пористость, включения, крупные столбчатые дендриты, остаточные напряжения и деформации, плохая межслоевая адгезия. Одним из перспективных направлений в области лазерных и аддитивных технологий является сочетание традиционных методов изготовления металлических изделий с ультразвуковыми технологиями [2]. К преимуществам этой комбинированной технологии можно отнести: уменьшение дефектов, контроль за процессом структурообразования и возможная гомогенизация микроструктуры, улучшение физико-механических свойств; В настоящей работе проводится исследование процесса прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием с использованием металлического порошка из нержавеющей стали, с целью изучения влияния высокочастотных колебаний на микроструктуру традиционных столбчатых дендритов. Для проведения экспериментов был разработан специальный стенд. Для определения распределения по размерам столбчатых дендритов написана программа на языке MATLAB.

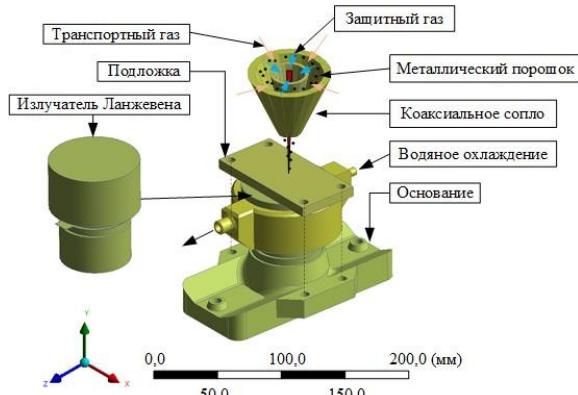


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Сравнительный анализ гистограмм распределения размеров столбчатых дендритов показал, что для традиционной технологии среднеквадратическое отклонение близко к 1, что указывает на значительный разброс размеров и неравномерность структуры. В то время как для комбинированной технологии размеры дендритов более сгруппированы вокруг среднего значения, что свидетельствует о более равномерном распределении и структурной однородности.

Список литературы

1. Xuekai Li, Wei Wang, Yihong Wu, Donghu Zhou, Huijun Kang, Enyu Guo, Jiehua Li, Zongning Chen, Yanjin Xu, Tongmin Wang, Ultrasonic field-assisted metal additive manufacturing (U-FAAM): Mechanisms, research and future directions, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 111, 2024, 107070, ISSN 1350-4177, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107070>.
2. Kumar S., Kumar D., Singh I., Rath D. An insight into ultrasonic vibration assisted conventional manufacturing processes: A comprehensive review. Advances in Mechanical Engineering, 2022, Vol. 14, Issue 6, p. 1687813222110781, SAGE Publications. <https://doi.org/10.1177/1687813222110781>

И.А. БУЛЫЧОВ, К.Н. МАКАРОВ, В.А. ОСТРОВСКИЙ, М.В. ПУТИЛИН
 АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ В YB:YAG ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЕ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Представлены результаты оптимизации коэффициента усиления многопроходной Yb:YAG лазерной системы с диодной накачкой, основанной на выборе длины волны лазерного излучения λ_{opt} , соответствующей максимальному усиления при выбранной температуре активных элементов (АЭ).

I.A. BULYCHOV, K.N. MAKAROV, V.A. OSTROVSKY, M.V. PUTILIN
 JSC «SRC RF TRINITI», Moscow, Troitsk, Russia

OPTIMIZATION OF THE GAIN COEFFICIENT IN A DIODE-PUMPED YB:YAG LASER SYSTEM

The results of the gain coefficient optimization of a multipass Yb:YAG diode-pumped laser system based on the choice of the laser radiation wavelength λ_{opt} corresponding to the maximum gain at the selected temperature of the active elements (AE) are presented.

Лазерные установки с большой энергией импульсов и высокой средней мощностью используют усилительные модули (УМ) с диодной накачкой и дисковыми активными элементами (АЭ). Иттриево-алюминиевый гранат, легированный иттербием (Yb:YAG) считается одним из наиболее перспективных материалов для создания импульсных лазеров с высокой средней мощностью [1]. Усиление лазерного излучения в Yb:YAG происходит по квазитрёхуровневой схеме. Для повышения эффективности работы лазера АЭ требуется охлаждать до температур существенно ниже комнатной, чтобы перевести активную среду на четырехуровневую схему уровней. Система охлаждения и снятия тепловой нагрузки с АЭ УМ за счет теплообмена с потоком гелия позволяла изменять температуру в диапазоне $T = (100 \div 293)K$. В качестве АЭ использовались четыре образца лазерной керамики Yb:YAG, изготовленные на ФКП «ГЛП «Радуга». Концентрация иттербия 0,9 и 2,2 ат.%. На лицевые поверхности АЭ нанесено двустороннее просветляющим покрытие с коэффициентом отражения $\leq 0,2\%$ для длин волн 940 и 1030 нм. Мощность диодной накачки 30 кВт, длительность – 1,5 мс. С целью поглощения суперлюминесценции по периметру АЭ располагалась зона шириной 5мм (кладдинг): легированный хромом Cr⁴⁺:YAG.

Коэффициент усиления (КУ) УМ зависит от нескольких параметров: температуры АЭ, длины волны зондирующего излучения λ , сечения поглощения накачки, сечения вынужденного излучения АЭ. Оптимизация КУ 4-х проходного УМ состояла в том, что сначала была измерена спектральная зависимость КУ на одном проходе $k_{amp}^{1pass}(\lambda, T)$ (см. рис. 1а). Из рис. 1а видно, что при определенной температуре АЭ существует длина волны излучения λ_{opt} , при которой КУ на одном проходе максимальен. Оптическая схема УМ представляла собой 4-х проходную схему с передачей изображения и пространственными фильтрами на каждом проходе. При измерении зависимости КУ на 4-х проходах от температуры АЭ (см. рис. 1б) использовалось излучение с длиной волны λ_{opt} .

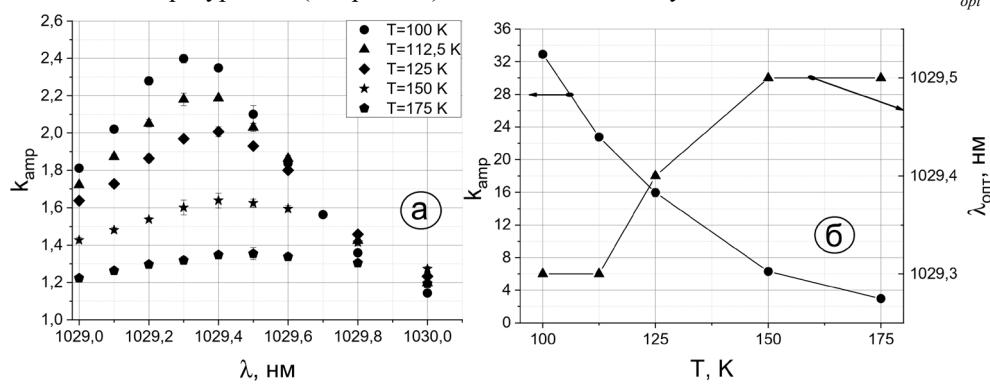


Рис. 1. а – спектральная зависимость коэффициента усиления $k_{amp}^{1pass}(\lambda, T)$ на одном проходе при разных температурах АЭ; б – зависимость $k_{amp}^{4pass}(T, \lambda_{opt})$ на четырех проходах от температуры АЭ при оптимальной длине волны λ_{opt}

Работа выполнена в рамках Единого отраслевого тематического плана НИОКР Госкорпорации «Росатом»: договор №313/1754-Д от 23.09.2019

Список литературы

1. С.Г. Гаранин, В.Н. Деркач, К. Н Макаров и др./// Доклады РАН. Физика, Технические науки. 2023. Т. 513. С. 18–28

А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, М.В. НЕРОДА, Б.Г. ХОЛОДАРЬ
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 10Г2 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ НА ИЗГИБ

Проведено исследование на изгиб образцов прямоугольного сечения из конструкционной стали 10Г2 после лазерной закалки и лазерного легирования. Установлено, что наличие зоны лазерного воздействия приводит к повышению области упругой работы образцов в пределах 20-30 процентов в соответствии с реализованным режимом обработки материала и еще более значительному увеличению уровня воспринимаемой максимальной нагрузки.

A.I. VERAMEICHYK, M.V. NERODA, B.G. HOLODAR
Brest State Technical University, Brest, Belarus

MECHANICAL TESTS OF STEEL 10G2 SAMPLES AFTER LASER HARDENING AND ALLOYING IN BENDING

A bending study was carried out on samples of rectangular cross-section made of structural steel 10G2 after laser hardening and laser alloying. It has been established that the presence of a laser impact zone leads to an increase in the elastic work area of the samples within 20-30 percent in accordance with the implemented material processing mode and an even more significant increase in the level of perceived maximum load.

Образцы из стали 10Г2 толщиной 6 мм, шириной 20 мм и длиной 200 мм подвергались лазерной обработке излучением волоконного иттербийового лазера мощностью 1 кВт с объективом для фокусировки лазерного излучения, системой перемещения и сканирующей лазерный луч головкой при различных режимах закалки и легирования. Для каждого режима использовалось по три образца. На противоположных плоскостях образца наносилось поочередно по 5 дорожек шириной 4 мм и длиной 170 мм. Прохождение каждой дорожки производилось от одного заранее отмеченного торца образца. При лазерном легировании на образцы предварительно наносилась смесь бора аморфного с ацетоном и клеем БФ-4. После обработки все образцы приобрели некоторую начальную погибь в связи с возникновением остаточных напряжений после теплового воздействия и охлаждения образцов.

При проведении испытаний на изгиб образцы устанавливались горизонтально плоской стороной симметрично на две неподвижные опоры с врачающейся цилиндрической обоймой диаметром 5 мм, расположенные на расстоянии 170 мм друг от друга, и среднему поперечному сечению образцов придавалось вертикальное перемещение с постоянной скоростью $V=1$ мм/мин. Испытания проведены на испытательной машине Kason WDW-50 (Китай).

В процессе нагружения фиксировалось перемещение точки контакта образца с нагружающим штоком (до 43-53 мм) и соответствующее ему усилие. Кроме того, непосредственно на испытательном стенде определялось перемещение центрального сечения образца после разгрузки, а также остаточный прогиб образца после выгрузки из установки. Ни один из образцов в испытаниях не разрушился, видимых трещин в их теле также не обнаружено. В связи с реализацией в процессе испытаний свободного опирания образцов имело место проскальзывание их концевых участков на опорах (до 12-13 мм с каждой стороны) и заметное истирание рельефа поверхности за счет действия сил трения скольжения.

По результатам испытаний в координатах «сила – перемещение» построены диаграммы нагружения образцов (рис. 1). Результаты исследований показывают, что наличие лазерного воздействия приводит к повышению зоны упругой работы образцов в пределах 20-30 % в соответствии с реализованным режимом обработки материала (при скорости лазерной головки 500 мм/мин результаты выше, чем при 700 мм/мин) и еще более значительному увеличению уровня воспринимаемой максимальной нагрузки (у легированных образцов выше, чем у закаленных). Исходная погибь образцов, полученная после термообработки, при испытаниях показала влияние в пределах менее 3-8 % от максимального уровня нагрузки, реализующейся в своей серии, причем более высокая нагрузка имеет место при установке образца выпуклостью вверх [1].



Рис. 1. Образцы после испытаний (а) и диаграммы нагружения образцов серии 3 (б)

Список литературы

1. Веремейчик, А. И. Испытания на изгиб образцов из стали 10Г2 после лазерной закалки и легирования / А. И. Веремейчик [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 3 (68). – С. 71–77.

М.С. ВОРОБЕЙ, Т.И. КОЗЛОВА, К.Л. ГУБСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ОДНОЧАСТОТНОГО ВОЛОКОННОГО ЭРБИЕВОГО ЛАЗЕРА

Создана в среде программирования python модель эволюции мощности излучения волоконного эрбиевого лазера с кольцевым резонатором. Собран лазер, измерены ватт-ваттные и спектральные зависимости, проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений.

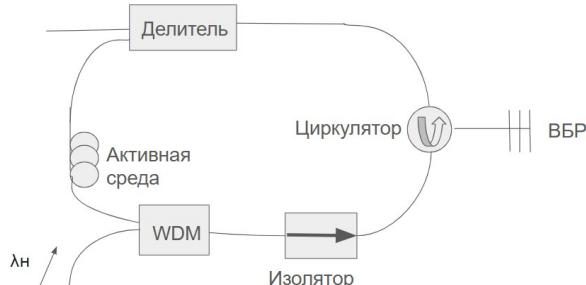
M.S. VOROBEIY, T.I. KOZLOVA, K.L. GUBSKIY
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A SINGLE-FREQUENCY FIBER ERBIUM LASER

A model of the evolution of the radiation power of an erbium fiber laser with a ring resonator has been created in the python programming environment. The laser was assembled, the watt-watt and spectral dependences were measured, and the calculated and experimental values were compared.

Одночастотные лазеры широко используются в оптической метрологии как мера длины [1], среди них наиболее распространенным является частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер. Однако его применение в много-канальных системах ограничено выходной мощностью. Волоконный эрбиевый лазер, стабилизированный по частоте насыщенного поглощения в ячейке с ацетиленом, может снять это ограничение.

При разработке волоконного лазера требуется определение оптимальных характеристик составных частей, в частности длины активной среды, уровня накачки, длины насыщающегося поглотителя, коэффициента деления выходного ответвителя. Для этого в среде программирования python было проведено численное моделирование эволюции мощности излучения. На рисунке 1 приведена схема собранного лазера, в котором в качестве активной среды используется легированное ионами эрбия волокно. Система уравнений, описывающая работу лазера по трехуровневой схеме, может быть решена методом Рунге–Кутты 4-го порядка и методом стрельбы [2], который позволяет преобразовать краевую задачу Коши с начальными условиями.



Rис. 1. Волоконный лазер с кольцевым резонатором: WDM – спектрально-селективный ответвитель, Активная среда – легированное эрбием волокно, Изолятор – поляризационно-нечувствительный оптический изолятор, Циркулятор – поляризационно-нечувствительный оптический циркулятор, ВБР - волоконная брэгговская решетка, Делитель – спектрально-нечувствительный ответвитель.

Согласно численной модели, оптимальная длина активной зоны составляет 3 м. При накачке излучением на длине волны 976 нм мощностью 500 мВт с выходным ответвителем 10:90 выходная мощность генерации на длине волны 1550 нм составила 85 мВт, непоглощенная накачка не превышала единицы мкВт. Для увеличения мощности генерации необходимо повышение эффективности ввода накачки в активную среду, для этого будет изготовлен и установлен адаптер модового поля. При длине резонатора около 6 м частотный интервал составляет $\Delta\nu \approx 17$ МГц. В спектр отражения однородной волоконной брэгговской решетки $R = 99,9\%$ шириной 0,1 нм (12,5 ГГц) попадает более 700 продольных мод. Для их селекции в кольцевой резонатор перед ВБР был установлен ненакачиваемый эрбиевый насыщающийся поглотитель длиной 1 м с коэффициентом поглощения на длине волны генерации 80 дБ/м, что позволило снизить количество мод до 7. В дальнейшем будет изменена длина насыщающего поглотителя для достижения одночастотного режима, а также реализована частотная стабилизация.

Список литературы

1. Shixin Xue, Mingxiao Li, Pockels Laser Directly Driving Ultrafast Optical Metrology 9 Oct 2024.
2. Johan Meyer, Justice Sompo, and Suné von Solms, FIBER LASERS Fundamentals with MATLAB® Modelling, First edition published 2022.

Г.Н. ДУБРОВИН, П.Е. САМАРИН
ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1064 И 532 НМ ДЛЯ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАМИНАРНУЮ СТРУЮ ВОДЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ДЛИНЫ СТРУИ

Получены данные о эффективности ввода лазерного излучения с длиной волны 1064 и 532 нм в ламинарную струю воды. Рассмотрен процесс формирования ламинарной струи при подаче воды под давлением выше 60 бар через сапфировые сопла с диаметром отверстий 50-140 мкм. Получена зависимость рабочей длины струи от диаметра сопла и используемого ассистирующего газа.

G.N. DUBROVIN, P.E. SAMARIN
NTO «IRE-Polus», Fryazino, Russia

APPLICATION OF 1064 AND 532 NM WAVELENGTH LASERS FOR COUPLING RADIATION INTO A LAMINAR WATER JET AND STUDYING THE WORKING LENGTH OF THE JET

Data on the efficiency of introducing laser radiation with a wavelength of 1064 and 532 nm into a laminar water jet are obtained. The process of forming a laminar jet when feeding water under pressure above 60 bar through sapphire nozzles with a hole diameter of 50-140 μm is considered. The dependence of the working length of the jet on the nozzle diameter and the assisting gas used is obtained.

Технология гидролазерной резки является уникальным процессом разделения материалов. Лазерный луч подводится к заготовке внутри ламинарной струи воды, распространяясь как по волокну. При контакте струи с заготовкой лазерное излучение испаряет материал, а вода непрерывно охлаждает зону обработки и удаляет продукты абляции. В результате процесс гидролазерной резки характеризуется качеством реза с низкими параметрами шероховатости поверхности, отсутствием грата и зоны термического влияния.

Поглощение лазерного излучения водой является определяющим параметром при оценке той мощности, которая доставляется к заготовке. В данной работе были проведены измерения средней мощности в ламинарной струе воды в различных участках по длине струи для длин волн 1064 и 532 нм. Потери средней мощности для наносекундного и QCW-лазера с длиной волны 1064 нм составили 29-32% и 32-35% соответственно, для зелёного наносекундного лазера – менее 22 % на длине струи 20 мм от среза сопла диаметром 80 мкм. Полученные результаты сравниваются с имеющимися литературными данными [1].

Также в данной работе исследуется «рабочая длина струи», на которой возможно распространение лазерного излучения. Данный параметр определяет максимальную толщину заготовки, которую возможно разделить методом гидролазерной резки и расстояние между оптической головой и обрабатываемой поверхностью. Экспериментально установлена зависимость длины струи от диаметра используемого сопла, а также оценивается влияние применения ассистирующего газа. Так для сопла диаметром 80 мкм эффективная длина струи составила 40 мм без газа, 35 мм при подаче сжатого воздуха и 55 мм с гелием (Рис. 1.).

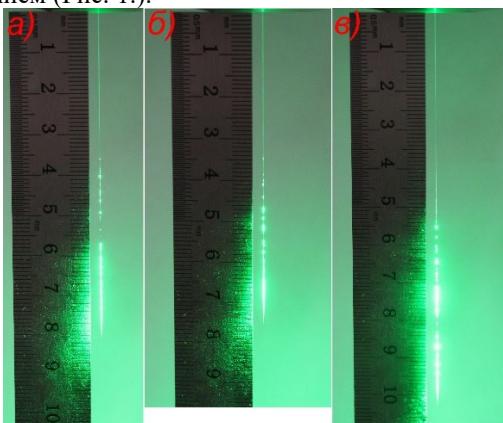


Рис. 1. Фотография ламинарной струи воды при проходе через неё излучения зелёного наносекундного лазера: а) без ассистирующего газа, б) с воздухом, в) с гелием

По результатам данной работы для технологии гидролазерной резки наиболее перспективно использовать источники с длиной волны 532 нм. Для достижения наибольшей плотности энергии в зоне обработки необходимо стремиться к уменьшению диаметра струи. Применение гелия, как ассистирующего газа позволяет увеличить «рабочую длину струи».

Список литературы

1. Yan Liu, Meirong Wei, Tao Zhang, Hongchao Qiao, Hui Li, “Overview on the development and critical issues of water jet guided laser machining technology” Optics and Laser Technology № 137, 2021

И.О. КОЖЕВНИКОВ, А.А. СЕРДОБИНЦЕВ, Е.С. ПРИХОЖДЕНКО

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕДНОГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ ГИБКИХ ПОДЛОЖЕК ИЗ ПОЛИИМИДА

Предложен способ повышения качества электродинамических структур лазерной абляцией путём добавления поверхностного слоя более стойкого металла. Добавление слоя Ni позволяет достичь лучшего качества краёв, а использование Ti предотвращает рост электрического сопротивления структуры за счёт пассивации меди в ходе лазерной обработки на воздухе.

I.O. KOZHEVNIKOV, A.A. SERDOBINTSEV, E.S. PRIKHOZHDENKO

National Research University SSU (Saratov State University), Saratov, Russia

IMPROVING THE QUALITY OF LASER ABLATION OF COPPER THIN-FILM COATING OF FLEXIBLE POLYIMIDE SUBSTRATES

A method is proposed to improve the quality of electrodynamic structures by laser ablation by adding a surface layer of a more resistant metal. The addition of a Ni layer allows for better edge quality, and the use of Ti prevents an increase in the electrical resistance of the structure due to copper passivation during laser treatment in air.

Разработка доступных и технологичных подходов для создания устройств гибкой электроники имеет высокую актуальность ввиду динамичного развития данной области. Одним из направлений разработок являются гибкие импедансные датчики для носимых систем контроля физиологических параметров человека. Ранее была предложена методика формирования электродинамических систем на гибких полиимидных подложках на основе магнетронного распыления и лазерной абляции [1], развитию которой посвящена настоящая работа.

В работе оценивалось влияние дополнительного слоя из твердого металла на качество лазерной деметаллизации (абляции) медного тонкопленочного покрытия гибких подложек из полииамида. Тестовые образцы представляли гибкую полиимидную подложку толщиной 500 мкм, на которой методом магнетронного распыления в вакууме были сформированы следующие варианты слоистых покрытий: 1) Cr/Cu, 2) Cr/Cu/Ti, 3) Cr/Cu/Ni. Для этого использовалась вакуумная установка Robvac VSM300, оснащённая тремя магнетронными источниками с дисковыми мишениями диаметром 50 мм. Первый слой Cr (100 нм на всех образцах) необходим для повышения адгезии Cu к полиимидной подложке. Толщина медного слоя на всех образцах составляла 1 мкм. Толщина слоёв Ti и Ni на образцах 2 и 3 составляла 100 нм. Деметаллизация производилась с помощью импульсного лазера установки Минимаркер 2 со следующими параметрами: длительность импульса 8 нс, частота 99 кГц, скорость сканирования 1000 мм/с, мощность 6 Вт. Шаблоном для деметаллизации выступало инвертированное изображение полосок толщиной 0,1 – 0,5 мм с шагом 0,1 мм, а также инвертированное изображение структуры СВЧ патч-антенны с зазорами порядка 150 мкм.

Установлено, что дополнительный слой более твердого металла на поверхности медного тонкопленочного покрытия гибких подложек из полииамида улучшает качество деметаллизации. Без него наблюдаются участки с дефектами в виде не удаленной медной пленки, закорачивающей отдельные элементы антенны. На образцах с дополнительным покрытием из более твердого металла деметаллизация проходит точно по шаблону без дефектов. Также установлено, что при использовании Ni в качестве дополнительного металла края металлических областей получаются более ровными, чем при использовании Ti.

Однако электрическое сопротивление полосок с покрытием Ti наименьшее (рис.1), что можно объяснить пассивацией слоя Cu, предотвращающей её окисление. Слой Ni в процессе лазерной обработки, по-видимому, образует сплав с Cu, что приводит к росту электрического сопротивления.

Рассмотренная методика ввиду своей высокой разрешающей способности может использоваться при изготовлении проводящего покрытия заданной топологии на гибкой подложке, например, гибких СВЧ антенн и излучателей, волноводов, биологических сенсоров и т.д.

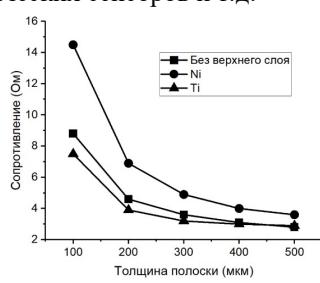


Рис. 1. Зависимость электрического сопротивления от толщины полосок металла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10270, <https://rscf.ru/project/22-79-10270/>

Список литературы

1. A. V. Starodubov, A. A. Serdobintsev, V. V. Galushka and others // 2019 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC), St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 138-140.

КИРЕЕВ С.В., КОНДРАШОВ А.А., КУСМАНКУЛОВ Б., МАРШИН Н.А., ГИЛЬМУЛЛИН А.Р.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ АДАПТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ (СИГНАЛОВ), ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА TDLAS, ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ

В работе проведен сравнительный анализ эффективности различных адаптивных фильтров на примере фильтрации экспериментальных спектров газов. Реализованы и исследованы алгоритмы адаптивных фильтров LMS, NLMS и RLS. Оценена их производительность в условиях наличия шумов и искажений, характерных для экспериментальных спектров. Представлены результаты фильтрации, проведен анализ преимуществ и ограничений каждого алгоритма, а также предложены рекомендации по выбору фильтра для обработки спектральных данных.

KIREEV S.V., KONDRASHOV A.A., KUSMANKULOV B., MARSHIN N.A., GILMULLIN A.R.

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE OPERATION OF DIGITAL ADAPTIVE FILTERS WHEN PROCESSING EXPERIMENTAL DATA (SIGNALS) OBTAINED USING THE TDLAS METHOD FOR VARIOUS GASES

This study presents a comparative analysis of the effectiveness of various adaptive filters applied to the filtering of experimental gases spectra. Implemented and examined algorithms include LMS, NLMS, and RLS. Their performance was evaluated under conditions of noise and distortions typical for experimental spectra. The results of the filtering are presented, along with an analysis of the advantages and limitations of each algorithm. Recommendations are provided for selecting the most suitable filter for spectral data processing.

В спектроскопии поглощения одной из ключевых задач является улучшение отношения сигнал/шум, так как наличие шумов значительно затрудняет анализ экспериментальных спектров. Для повышения качества обработки данных и устранения искажений применяются методы цифровой фильтрации. Особенно актуальными являются адаптивные фильтры, которые позволяют эффективно работать в условиях изменяющихся характеристик шума [1].

В рамках исследования были реализованы и протестированы три алгоритма адаптивной фильтрации:

1. LMS (Least Mean Squares) — алгоритм с минимизацией среднеквадратичной ошибки, простой в реализации.
2. NLMS (Normalized LMS) — модификация LMS с нормализацией, обеспечивающая стабильность работы при изменении уровня сигнала.
3. RLS (Recursive Least Squares) — алгоритм с рекурсивным методом наименьших квадратов, обеспечивающий быструю сходимость [2].

На основании анализа экспериментальных данных, были протестированы фильтры LMS, NLMS и RLS, примененные к спектрам поглощения газов, искаженным шумами различной природы.

По результатам обработки экспериментальных данных сигналов поглощения диоксида углерода в ближнем ИК диапазоне спектра, наилучший результат продемонстрировал LMS-фильтр, обеспечив максимальное улучшение SNR на 7,7 дБ. Этот фильтр рекомендован для задач, где требуется высокая степень подавления шума. Следует отметить, что наибольшую скорость сходимости показал RLS фильтр.

Итоги анализа подтверждают, что использование адаптивных фильтров значительно повышает точность обработки спектров, что особенно важно для спектроскопических измерений. Выбор фильтра следует осуществлять с учетом уровня шума, характеристик спектра и требований к скорости обработки данных.

Список литературы

1. Xiaonan Liu, Shunda Qiao, and Yufei Ma, "Highly sensitive methane detection based on light-induced thermoelastic spectroscopy with a 2.33 μm diode laser and adaptive Savitzky-Golay filtering," Opt. Express 30, 1304-1313 (2022).
2. Джиган В.И., Адаптивная фильтрация сигналов теория и алгоритмы. Москва: Техносфера, 2013. – 528 с., ISBN 978-5-94836-342-4.

А.П. ПИЛИПЧУК, О.Г. ДЕВОЙНО

Военная академия Республики Беларусь, Минск Белорусский национальный технический университет, Минск

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Разработаны математические модели формирования одноосного напряженного состояния в стержне с неравномерным распределением температуры по ширине и плоского напряженного состояния в круглой стальной пластине при воздействии нормально-кругового источника тепла. Представленные результаты моделирования подтверждают, что разработанные модели позволяют учитывать влияние различных факторов на распределение напряжений.

A.P. PILIPCHUK, O.G. DEVOINO

Academy of Military of the Republic of Belarus, Minsk Belarusian National Technical University, Minsk

RESULTS OF STRESS STATE MODELING DURING LASER PROCESSING

Mathematical models of stress state formation under the influence of a normal-circular heat source have been developed. The presented modeling results confirm that the developed models allow taking into account the influence of various factors on stress distribution.

В настоящее время актуальной задачей является определение режимов лазерной обработки, обеспечивающих формирование поверхностного слоя без трещин (рис. 1, 2) и с минимальными деформациями (рис. 3). Для решения данной задачи целесообразно использовать математическое моделирование.



Рис. 1 Трещины в поверхностном слое лопатки (ИХХ) после лазерной закалки

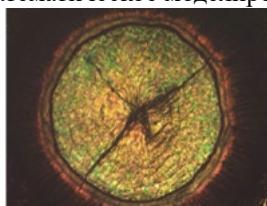


Рис. 2 Трещины при импульсном лазерном воздействии (титановый сплав)



Рис. 3 Бесконтактная лазерная деформация

В результате моделирования процесса формирования одноосных напряжений установлено, что неравномерное распределение температуры по ширине сечения (рис. 4) влияет на формирование зон растягивающих и сжимающих напряжений. Максимальное напряжение и глубина его расположения зависят от скорости перемещения лазерного луча, поэтому появление пластического течения возможно в подповерхностных слоях деталей, работающих в условиях контактного нагружения (рис. 5). Плоское напряженное состояние, возникающее в пластине под воздействием лазерного луча (рис. 6) характеризуется совокупностью радиальных и окружных напряжений (рис. 7). Эти напряжения определяют когезионную прочность поверхностного слоя. Результаты расчетов показывают, что на этапе нагрева в образцах возможно возникновение окружных напряжений, превышающих предел текучести. Данные напряжения являются причиной образования радиальных трещин, что подтверждается результатами экспериментальных исследований (рис. 2).

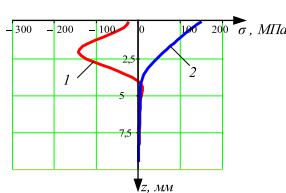
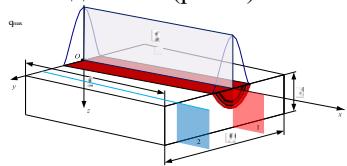


Рис. 4 Расчетная схема лазерной обработки (быстро движущийся источник)

Рис. 5 Распределение остаточных напряжений по сечению образца (скорость 200 мм/мин, 1-центр, 2-край дорожки)

Рис. 6 Расчетная схема нагрева пластины

Рис. 7 Распределение напряжений в алюминиевой пластине ($d_a=1,5$ мм, $P=1$ кВт, $S=2$ мм, $t=30$ сек.)

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод, что разработанные модели позволяют выявлять закономерности процесса формирования напряженно-деформированного состояния при лазерной обработке и способствуют определению эффективных способов управления данным процессом.

Список литературы

1. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М.: ГНТИМЛ, 1951. – 298 с.
2. Термопрочность деталей машин / И. А. Биргер [и др.]. М.: «Машиностроение», 1975. – 455 с.

В.И. ПИЧИЕНКО¹, В.Д. ВОРОНОВ¹, Э.Д. ИШКИНЯЕВ¹, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, Е.Н. БЛИНОВА², М.А. ЛИБМАН²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия ²Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ В СИСТЕМАХ Fe-Cr-Ni ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В данной работе рассматривается метод создания равномерного температурного поля в образцах Fe-Cr-Ni с применением предварительного математического моделирования. Исследуется зависимость механических свойств образцов, обработанных в различных температурных режимах.

V.I. PICHENKO¹, V.D. VORONOV¹, E.D. ISHKINYAEV¹, V.N. PETROVSKIY¹, E.N. BLINOVA², M.A. LIEBMAN²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²I.P. Bardin Central Scientific Research Institute of Ferrous Metallurgy, Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE FORMATION OF METASTABLE STRUCTURAL CONDITIONS IN Fe-Cr-Ni SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE OF LASER THERMAL RADIATION

In this paper, we consider a method for creating a uniform temperature field in Fe-Cr-Ni samples using preliminary mathematical modeling. The dependence of the mechanical properties of samples processed in various temperature conditions is investigated.

Одним из видов лазерной термической обработки является создание функционально-градиентных материалов (ФГМ), которые характеризуются локальными изменениями механических свойств. Важным свойством металлов, из которых изготавливают ФГМ является возможность прямого и обратного аустенитно-мартенситного превращения, а также локальность и равномерность поля нагрева образца. Лазерное излучение и позволяет получить необходимые условия воздействия, так как её основными преимуществами является: локализованность, скорость и возможность варьирования параметров обработки.

В работе использовался сплав Fe-Cr-Ni (Cr – 18%; Ni – 10%; Si -0,5%; C – 0,07%; Mn – 1%; V – 0,04%; Fe – остальное), физической особенностью которого является возможность как прямого, так и обратного аустенитно-мартенситного превращения. Прямое превращение было осуществлено с помощью холодной пластической деформации, а обратное – ЛТО. В работе использовался двухосевой сканатор, который позволял осуществлять осцилляции лазерного луча с частотой порядка 170 Гц, благодаря чему охлаждение материала не успевало происходить и полуволновые колебания луча можно считать за новое квазистационарное пятно. Для более рационального подбора режимов мощности для каждого из температурных диапазонов было проведено математическое моделирование с использованием интегральной интенсивности для минимизации времени расчётов. Основными параметрами, которые влияли на процесс были скорость движения, перпендикулярная траектории осцилляций и изменение мощности излучения в ходе обработки. Наиболее оптимальные параметры были подобраны с помощью моделирования при вспомогательных испытаниях с использованием тепловизора для учёта влияния изменения коэффициента поглощения, который варьируется в течение процесса и не имеет точных теоретических расчётов для прогнозирования.

После нахождения подходящих температурных режимов в диапазоне от 600 до 900°C были проведены испытания на растяжение. Полученные данные показывают, что с помощью лазерной термической обработки удалось достичь повышения пластичности материала в 2 раза, а также снижение прочности.

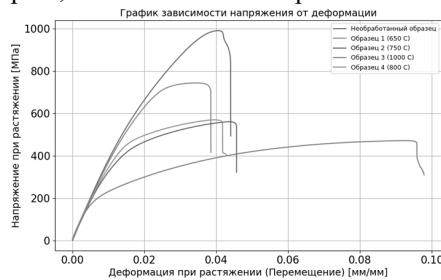


Рис.1. График зависимости напряжения от деформации для обработанных образцов

Список литературы

1. Е. Н. Блинова Влияние лазерной обработки на прочностные характеристики γ -фазы в сплавах системы железо-хромникель / Е. Н. Блинова, М. А. Либман, В. Н. Петровский, Е. В. Пименов, П. П. Умнов, В. П. Филиппова, Т. Р. Чуева, Н. А. Шурыгина [Текст] // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ. — 2021. — Т. 85. № 7. — С. 984–989.
2. S. Martíneza, A. Lamikiza, E. Ukara, A. Calleja, J.A. Arrizubietaa, L.N. Lopez de Lacallea Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process [Текст] / S. Martíneza, A. Lamikiza, E. Ukara, A. Calleja, J.A. Arrizubietaa, L.N. Lopez de Lacallea // Optics and Lasers in Engineering. — 2017. — № 90. — С. 72-80.

Д.И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА ДВОЙНУЮ ИОНИЗАЦИЮ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ИНТЕНСИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ

Исследовано влияние электрон-электронного взаимодействия на вероятность двукратной туннельной ионизации отрицательного иона брома Br⁻ в поле интенсивного униполярного лазерного импульса, исключающего эффект перерассеяния. С помощью численного решения нестационарного уравнения Шредингера для двухэлектронного одномерного и двумерного иона брома в импульсах различной длительности исследованы возможность коллективного туннелирования двух электронов и применимость одноэлектронного приближения для описания двойной ионизации. Показано, что электрон-электронное взаимодействие подавляет канал коллективной ионизации, однако степень этого подавления уменьшается с увеличением размерности фазового пространства. Было также показано, что учет электронных корреляций в случае коротких лазерных импульсов (~1–10 fs) может на порядок уменьшить вероятность туннелирования второго электрона по сравнению со случаем независимого туннелирования невзаимодействующих электронов. Для более длинных импульсов (~30 fs) вероятности двойной ионизации в одноэлектронном приближении и в случае взаимодействующих электронов отличаются менее чем на 1%.

D. I. TYURIN, S. V. POPRuzhenko

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

EFFECT OF ELECTRON-ELECTRON CORRELATIONS ON DOUBLE IONIZATION OF NEGATIVE IONS IN INTENSE LASER FIELDS

We consider the influence of the electron-electron interaction on the probability of double tunnel ionization of negative bromine ion Br⁻ in the field of an intense ultrashort unipolar laser pulse when the effect of rescattering is eliminated. By solving numerically the time-dependent Schrödinger equation for two-electron one- and two-dimensional bromine ion in pulses of different duration we investigate a possible channel of two-electron collective tunneling and applicability of the single-electron approximation for description of double ionization. We show that the electron-electron repulsion suppresses the collective channel, however, this suppression weakens with increasing the phase space dimensionality. We also show that electron-electron correlations in the case of short laser pulses (~1–10 fs) can reduce the probability of tunneling of the second electron by an order of magnitude compared to the independent tunneling of non-interacting electrons. For longer pulses (~30 fs), the probabilities of double ionization calculated in the single-electron approximation and in the case of interacting electrons differ by less than 1%.

Электрон-электронное взаимодействие при многократной ионизации атомов и ионов может значительно влиять на механизм ионизации и приводить к эффектам, которые не описываются в приближении невзаимодействующих электронов. Наиболее сильным эффектом, связанным с электронными корреляциями, является перерассеяние электрона на родительском ионе. В настоящее время установлено, что этот механизм вносит основной вклад в двойную ионизацию в линейно поляризованных лазерных полях [1]. Однако в циркулярно поляризованных или униполярных импульсах перерассеяние подавлено, что дает возможность изучать другие, более слабые, корреляционные эффекты. Одним из таких эффектов, обсуждаемых в литературе, является коллективное туннелирование [2]. В работе [3] было показано, что если два электрона могут туннелировать вместе как единая квазичастица, то это должно качественно изменить импульсное распределение двукратных ионов (под двукратным ионом мы понимаем здесь атомную систему, потерявшую два электрона относительно своего исходного состояния: в случае отрицательно заряженных ионов двукратный ион будет иметь заряд +1) по сравнению со случаем последовательной независимой ионизации.

В данной работе с помощью численного решения нестационарного двучастичного уравнения Шредингера мы изучаем возможность формирования такой квазичастицы в поле униполярного электромагнитного импульса. Анализ формул Переломова-Попова-Терентьева [4] для вероятности последовательной ионизации и их обобщения [2] на случай коллективной ионизации показал, что коллективный канал должен вносить наибольший вклад при ионизации отрицательного иона брома. Однако численное решение нестационарного уравнения Шредингера демонстрирует, что электрон-электронное отталкивание существенно препятствует образованию квазичастицы из двух электронов, что подавляет коллективный канал ионизации. Сравнение эволюции волновой функции в случае ионизации одномерного и двумерного диффузийного иона брома показало, что с увеличением фазового пространства подавление канала коллективной ионизации уменьшается.

Кроме этого в работе обсуждается влияние электрон-электронного взаимодействия на применимость одноэлектронного приближения для описания последовательной ионизации. Численные расчеты показали, что в случае коротких лазерных импульсов длительностью 1–10 fs электронные корреляции могут на порядок уменьшать вероятность ионизации второго электрона по сравнению со случаем, когда туннелирование происходит независимо. Однако для более длинных импульсов (~30 fs) вероятности двойной ионизации в одноэлектронном приближении и в случае взаимодействующих электронов отличаются менее чем на 1%.

Список литературы

1. Becker W. et al. // Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. P. 1011.
2. Зон Б.А. // ЖЭТФ. 1999. Т. 116. С. 410.
3. Попруженко С.В., Ломоносова Т.А. // Письма в ЖЭТФ. Т. 113. С. 320.
4. Переломов А.М., Попов В.С., Терентьев М.В. // ЖТЭФ. 1966. Т. 50 С. 1393; Т. 51 С. 309.

¹В.В. БУЛГАКОВА, ^{1,2}П.А. ЧИЖОВ, ¹А.А. УШАКОВ, ¹П.В. РАТНИКОВ, ¹Ю.Г. ГОНЧАРОВ,
¹А.К. МАРТЬЯНОВ, ¹В.В. КОНОНЕНКО, ³С.С. САВИН, ⁴И.В. ГОЛОВНИН, ¹В.И. КОНОВ,
¹С.В. ГАРНОВ

1 Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

2 Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

3 Наноцентр МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

4 Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ДИАГНОСТИКА ДИНАМИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ В АЛМАЗАХ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ – ТЕРАГЕРЦОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассматривается неинвазивный метод оптической накачки–терагерцового зондирования для экспериментального изучения динамики релаксации фотоиндуцированных носителей в легированных монокристаллах алмаза и новом композите алмаз–кремний. Плазмохимически осажденная из газовой фазы алмазная подложка с внедренными микрочастицами кремния демонстрирует два времени жизни фотоиндуцированных носителей (4 пс и 200 пс). При этом наблюдается в несколько раз короче время жизни носителей в алмазно-кремниевом композите, чем в легированных бором алмазах и легированных азотом алмазах, которые были выращены с использованием метода высокой температуры и высокого давления.

¹V.V. BULGAKOVA, ^{1,2}P.A. CHIZHOV, ¹A.A. USHAKOV, ¹P.V. RATNIKOV, ¹Yu.G. GONCHAROV,

¹A.K. MARTYANOV, ¹V.V. KONONENKO, ³S.S. SAVIN, ⁴I.V. GOLOVNIN, ¹V.I. KONOVOV,

¹S.V. GARNOV

1 Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

2 Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

3 Nanocenter MIREA, MIREA—Russian Technological University, Moscow, Russia

4 Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

DIAGNOSTICS OF CHARGE CARRIER DYNAMICS IN DIAMONDS BY OPTICAL PUMP – TERAHERTZ PROBE TECHNIQUE

A non-invasive optical pump-terahertz probe method to experimentally study the photoinduced carrier dynamics in doped diamond monocrystals and a new diamond-silicon composite are considered. The chemical vapor deposited diamond substrate with embedded silicon microparticles showed two photoinduced carrier lifetimes (4 ps and 200 ps). One observes the short lifetime is several times less than in boron-doped diamonds and nitrogen-doped diamonds which were grown using a high temperature-high pressure technique.

В последние три десятилетия активно исследуются методы генерации и регистрации терагерцового излучения, которое имеет перспективы использования в задачах неинвазивного исследования материалов, биомедицины и системах безопасности [1]. Одними из перспективных источников и приёмников терагерцового излучения являются фотопроводящие антенны, для разработки которых возникает потребность в поиске новых полупроводниковых материалов, выступающих в качестве подложки, заключенной между двумя электродами. Алмаз является наиболее перспективным материалом для мощных ТГц излучателей, так как обладает наибольшим порогом пробоя, высокой теплопроводностью, а также прозрачен в терагерцовом диапазоне. Основным недостатком является ширина запрещенной зоны 5.46 эВ, что требует излучения в УФ диапазоне, но легирование алмазов, например, азотом, снижает ширину запрещенной зоны и делает доступным применение импульсов в видимом диапазоне.

В данной работе рассматривается три вида алмазов: НРНТ (термобарический метод, основанный на кристаллизации алмаза из расплава углерода при высокой температуре и при высоком давлении) легированный азотом и бором, и кремний-алмазный композит с размерами кремниевых частиц 0.1 – 2 мкм, расположенных на расстоянии в несколько микрон друг от друга. Для исследования образцов применяются методики терагерцовой спектроскопии с временным разрешением, оптической накачки (возбуждение на длинах волн 800 и 400 нм) – терагерцового зондирования, Фурье-спектроскопии в инфракрасной и видимой областях, сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии КР [2].

В итоге была измерена динамика релаксации фотоносителей в образцах алмаза с примесями азота, бора и частиц кремния. Наблюдаются тенденция к сокращению времени релаксации фотоносителей для более дефектного материала. Глубина модуляции в ТГц-пропускании сильно зависит от уровня примесей и объема, в котором происходит поглощение. Введение микрочастиц кремния в образец алмаза приводит к двойной релаксационной динамике. Предложен механизм этой двойной рекомбинации фотовозбужденных носителей в композите алмаз-кремний. Он предполагает, что носители генерируются путем однофотонного поглощения в кремнии, а затем дрейфуют из кремния в кристаллическую решетку алмаза. В результате перехода носителей через границу кремний-алмаз рекомбинация фактически происходит в алмазе и задерживается эффектом разделения зарядов. Наблюданное явление может быть использовано для сверхбыстрой гибкой модуляции ТГц-волн.

Список литературы

1. Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics // New York: Springer 2010. P. 1–246.
2. Bulgakova V. et al. // Materials. 2024. Vol. 17, №. 1. P. 119.

В.С. ЦВЕТКОВ¹, Е.А. ДОБРЕЦОВА¹, Ю.Л. КАЛАЧЕВ¹, А.А. КРАВЦОВ², О.М. ЧАПУРА²,
В.А. ТАРАЛА², Е.В. МЕДЯНИК², Л.В. ТАРАЛА², В.Е. СУПРУНЧУК², Ф.Ф. МАЛЯВИН², С.В.
КУЗНЕЦОВ^{1,2}, В.А. ЛЯПИН²

^{1,2}Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

²Северо-Кавказский Федеральный университет, Ставрополь, Россия

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ ЛЮТЕЦИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА, АКТИВИРОВАННОЙ ИОНАМИ ЭРБИЯ

Прозрачных керамик на основе лютесций-алюминиевого граната с содержанием эрбия от 1 до 50 ат.% получены из керамических порошков путем горячего изостатического прессования. Определены концентрации эрбия, дающие наибольшую интенсивность люминесценции в спектральных диапазонах около ~1,5–1,6 мкм и ~2,7 мкм.

V.S. TSVETKOV¹, E.A. DOBRETSOVA¹, YU.L. KALACHEV¹, A.A. KRAVTSOV², O.M. CHAPURA²,
V.A. TARALA², E.V. MEDYANIK², L.V. TARALA², V.E. SUPRUNCHUK², F.F. MALYAVIN², S.V.
KUZNETSOV^{1,2}, V.A. LAPIN²

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

SPECTROSCOPIC CHARACTERISTICS OF HIGHLY TRANSPARENT CERAMICS BASED ON LUTETIUM ALUMINUM GARNET DOPED BY ERBIUM IONS

Highly transparent ceramics based on Lutetium-aluminum garnet with erbium content ranging from 1 to 50 at% were synthesized through hot isostatic pressing. Erbium concentrations yielding the highest luminescence intensity in spectral ranges around ~1.5–1.6 μm and ~2.7 μm were determined.

Матрицы на основе граната являются оптимальными кристаллическими матрицами для ионов Er^{3+} , которые обеспечивают превосходную эффективность лазерной генерации, люминесценцию, а также тепловые и оптические свойства. Однако, стоит отметить, что в отличие от иттрий-алюминиевого граната (YAG) лютесций-алюминиевый гранат (LuAG) демонстрирует минимальные изменения теплофизических свойств электронным пематрицы при легировании редкоземельными ионами. Это можно объяснить схожими ионными массами лютесция, эрбия и иттербия, а также близким соответствием их ионных радиусов. Существует ряд исследований, посвященных изучению лазерные свойства кристаллов Er:LuAG, в то время как керамика Er:LuAG остается недостаточно изученной. Данное исследование направлено на исследование оптических и люминесцентных свойств керамики Er:LuAG с концентрацией эрбия в диапазоне от 1 до 50 ат.%.

Спектры пропускания в диапазоне 300 – 3000 нм, полученные на образцах керамик Er:LuAG с концентрацией эрбия в диапазоне от 1 до 50 ат.%, содержат ряд линий, связанных с электронными 4f-4f переходами в ионах Er^{3+} . По мере увеличения концентрации активатора в образцах интенсивность этих полос поглощения также увеличивается. Во всех исследованных составах пропускание керамики Er:LuAG достигало $84,0 \pm 0,5\%$ на длине волны 1100 нм, что указывает на высокое оптическое качество образцов.

Спектры люминесценции получены в диапазоне 1440 – 1690 нм на электронном переходе $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ в ионе Er^{3+} керамик Er:LuAG. При увеличении концентрации легирующей примеси от 1 до 10 ат% интенсивность люминесцентных линий 1470 и 1530 нм остается практически неизмененной, в то время как интенсивности линий при 1570, 1620, 1649 и 1660 нм значительно увеличиваются. Это увеличение объясняется усилением поглощения при диодной накачке на 980 нм в составе 10 ат.% Er:LuAG по сравнению с 1 ат.% Er:LuAG. Дальнейшее увеличение концентрации Er^{3+} приводит к уменьшению относительной интенсивности излучения в диапазоне 1440–1680 нм, отчасти из-за прекращения между спектрами излучения и поглощения Er:LuAG, перепоглощения и концентрационного тушения люминесценции.

Серия узких полос излучения в диапазоне длин волн 2500–3000 нм соответствует электронным переходам $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ в ионе Er^{3+} в керамиках Er:LuAG. Положение спектральных линий люминесценции от перехода $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ изменяется с ростом концентрации эрбия. В керамических образцах при увеличении содержания эрбия от 10 до 50 ат.% полосы ниже 2780 нм смещаются в длинноволновую область (на ≈ 5 нм), а выше 2780 нм — в коротковолновую область (на ≈ 3 нм). Причина этого смещения заключается в уменьшении напряженности кристаллического поля. По мере увеличения содержания эрбия интенсивность люминесценции также постепенно увеличивается. Образец с концентрацией эрбия 50 ат.% демонстрирует почти в два раза большую интенсивность люминесценции, чем образец с 10 ат.% Er. Сигнал люминесценции от образца 1 ат.% Er:LuAG находится ниже порога чувствительности приемника.

Ю.А.ЧИВЕЛЬ
MerPhotonics , Сент Этьенн, Франция.

МЕТОД ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Разработан новый метод лазерной термической обработки. Представлена и обсуждается лазерная система для реализации метода.

Yu.CHIVEL
MerPhotonics, Saint Etienne , France

METHOD OF LASER THERMAL TREATMENT

New method for laser thermal treatment has been elaborated. Laser system for implementation new method has been constructed.

Известен метод лазерной термической обработки [1], состоящий в сканировании поверхности изделия пятном лазерного излучения с гауссовым распределением плотности мощности . Однако данный способ не позволяет с высокой точностью (10мкм) вести сканирование что приводит к возникновению областей разупрочнения на поверхности детали. Существует также метод термической обработки [2], состоящий в создании на поверхности изделия прямоугольного пятна фокусировки путем сканирования области пятна сфокусированным пятном лазерного излучения с гауссовым распределением мощности. Недостаток данного способа состоит в неравномерном распределении плотности мощности по сформированному прямоугольному пятну и сложности.

Разработан способ лазерной термической обработки, который состоит в нагреве поверхности обрабатываемого изделия сканирующим лазерным лучом отличающийся тем, что создают на поверхности изделия регулируемое по форме и размерам равномерное по площади распределение мощности лазерного излучения при оптическом контроле положения пятна фокусировки на поверхности изделия , температуры поверхности и распределения температуры по пятну облучения. Для реализации способа предложено устройство

, которое содержит лазер , фокусирующий объектив , закрепленные на платформе сканирования отличающееся тем ,что устройство дополнительно снабжено волоконной матрицей а лазер имеет несколько волоконных выходных каналов соединенных с волокнами матрицы. Кроме того устройство дополнительно снабжено регулируемым коллиматором и подвижным выходным объективом с возможностью программного управления

.Устройство дополнительно снабжено оптическим многоканальным пирометром, видеокамерой и специализированным лазерным дальномером, оптически коаксиально с пучком лазерного излучения, связанных с пятном лазерного облучения на поверхности обрабатываемой детали



В.В. КОНОНЕНКО¹, Т.В. КОНОНЕНКО¹, А.А. КУПРИЯНОВ¹, В.П. ПАШИНИН¹,
Е.В. ЗАВЕДЕЕВ¹, М.С.КОМЛЕНOK¹, Н.Д. КУРОЧИЦКИЙ¹, В.И. КОНОВ¹,
А.Т. САЛКОЗАНОВ², А.С. ГУСЕВ², Н.И. КАРГИН², С.Я. КИЛИН²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
vitali.kononenko@nsc.gpi.ru

ОДИНОЧНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ NV ЦЕНТРЫ В АЛМАЗЕ

В докладе рассматриваются фундаментальные аспекты воздействия лазерного излучения на монокристаллический алмаз. Основное внимание уделено необратимым лазерно-стимулированным изменениям структуры алмаза атомарного масштаба, которые кардинально меняют его физические и оптические свойства. Впервые сообщается о многоимпульсном лазерном формировании одиночных азотно- вакансационных центров в алмазе.

V.V. KONONENKO¹, T.V. KONONENKO¹, A.A. KUPRIYANOV¹, V.P. PASHININ¹, E.V. ZAVEDEEV¹, M.S.KOMLENOK¹, N.D. KUROCHITSKIY¹, V.I. KONOVO¹, A.T. SALKOZANOV²,
A.S. GUSEV², N.I. KARGIN², S.Y. KILIN²

¹ A.M. Prokhorov General Physics Institute, RAS

² National Research Nuclear University MEPhI,

SINGLE LASER NV CENTERS IN DIAMOND

This report examines fundamental aspects of the effect of laser radiation on single crystal diamond. The focus is on irreversible laser-stimulated changes in the atomic-scale structure of diamond that radically alter its physical and optical properties. The multi-pulse laser formation of single nitrogen vacancy centers in diamond is reported for the first time.

Алмаз — уникальный материал с широкими перспективами применения в самых различных технологиях, от конструктивных элементов, работающих в горячих и агрессивных средах, до фотонной платформы для квантовой связи и вычислений. Хотя проблема синтеза алмаза в значительной степени решена и качественные монокристаллические подложки алмаза коммерчески доступны, существующие методы обработки все еще не способны удовлетворить многочисленные требования различных прикладных приложений и находятся в процессе разработки. В докладе рассматриваются фундаментальные аспекты воздействия лазерного излучения на алмаз, с упором на необратимые структурные преобразования, которые влияют на физические и оптические свойства кристаллов.

Эффективная и контролируемая генерация центров окраски является ключевой проблемой в квантовых технологиях на основе алмаза. Эксперименты со многими фемто-, пико- и наносекундными импульсными источниками выявили ряд различных лазерно-стимулированных процессов, развивающихся на поверхности алмаза. На сегодняшний день продемонстрировано, что в результате лазерной обработки в алмазе может возникать несколько структурных комплексов на основе вакансий. Наиболее известным из них является дефект типа азот-вакансия (NV центр). Измерения люминесценции подтверждают, что при длительном облучении лазерными импульсами, концентрация NV центров увеличивается в десятки раз.

В докладе впервые сообщается о многоимпульсном лазерном формировании одиночных азотно- вакансационных центров в алмазе. Для создания NV-центров вблизи поверхности кристалла использовались различные дозы импульсов третьей гармоники Ti:sapp лазера (100 фс, 266 нм) с энергией значительно ниже порога графитизации. Фотолюминесцентная спектроскопия, сканирующее конфокальное картирование облученной поверхности, измерения статистики фотонов с субнаносекундным временным разрешением и оптически детектируемый магнитный резонанс использовались для идентификации сформированных излучающих центров, для доказательства их одиночности и для оценки целостности исходной алмазной решетки после лазерного воздействия. Представленные результаты указывают на то, что лазерное предабляционное облучение является перспективным инструментом для точного контроля количества генерируемых вакансий в решетке и, таким образом, формирования одиночных NV центров в заданных точках кристалла.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 075-15-2024-556).

Секция
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., профессор
Кудряшов Николай Алексеевич

Секретарь секции

– инженер
Нифонтов Даниил Романович

E-mail: DRNifontov@mephi.ru

А.В. АКСЕНОВ¹, А.Д. ПОЛЯНИН²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

СИММЕТРИИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, РЕДУКЦИИ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ ТИПА МОНЖА – АМПЕРА

Исследуется семейство сильно нелинейных нестационарных уравнений математической физики с тремя независимыми переменными, которые содержат произвольную степень первой производной по времени и квадратичную комбинацию вторых производных по пространственным переменным типа Монжа – Ампера. Получены формулы, дающие возможность строить многопараметрические семейства решений, исходя из более простых решений. Рассмотрены двумерные и одномерные симметрийные и несимметрийные редукции. Описаны автомодельные и другие инвариантные решения. Методами обобщенного и функционального разделения переменных построен ряд новых точных решений, многие из которых выражаются в элементарных функциях или в квадратурах. Для получения точных решений использовался также принцип структурной аналогии решений, а также различные комбинации всех вышеперечисленных методов. Некоторые решения построены с помощью вспомогательных промежуточных точечных или контактных преобразований.

A.V. AKSENOV¹, A.D. POLYANIN²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

SYMMETRIES, TRANSFORMATIONS, REDUCTIONS, AND EXACT SOLUTIONS OF NONLINEAR NONSTATIONARY MONGE–AMPÈRE TYPE EQUATIONS

A family of strongly nonlinear nonstationary equations of mathematical physics with three independent variables is investigated, which contain an arbitrary degree of the first derivative with respect to time and a quadratic combination of second derivatives with respect to spatial variables of the Monge–Ampère type. Formulas are obtained that make it possible to construct multiparameter families of solutions based on simpler solutions. Two-dimensional and one-dimensional symmetry and non-symmetry reductions are considered. Self-similar and other invariant solutions are described. A number of new exact solutions are constructed using methods of generalized and functional separation of variables, many of which are expressed in elementary functions or in quadratures. To obtain exact solutions, the principle of structural analogy of solutions was also used, as well as various combinations of all the above-mentioned methods. Some solutions are constructed using auxiliary intermediate point or contact transformations.

Исследуется семейство сильно нелинейных нестационарных уравнений типа Монжа – Ампера

$$u_{xx}u_{yy} - u_{xy}^2 = \sigma(u_t)^m,$$

где m и σ – произвольные постоянные. При $m = \pm 1$ это уравнение встречается в электронной магнитной гидродинамике и дифференциальной геометрии [1–3]. Методами группового анализа [2, 3] исследованы симметрии рассматриваемых параболических уравнений Монжа – Ампера. Получены формулы, дающие возможность строить многопараметрические семейства решений, исходя из более простых решений. Рассмотрены двумерные и одномерные симметрийные и несимметрийные редукции, приводящие исходное уравнение к более простым уравнениям в частных производных с двумя независимыми переменными или обыкновенным дифференциальным уравнением или системам таких уравнений. Описаны автомодельные и другие инвариантные решения. Методами обобщенного и функционального разделения переменных [4–5] построен ряд новых точных решений, многие из которых выражаются в элементарных функциях или в квадратурах. Для получения точных решений использовался также принцип структурной аналогии решений [6–7], а также различные комбинации всех вышеперечисленных методов. Некоторые решения построены с помощью вспомогательных промежуточных точечных или контактных преобразований. Найденные точные решения можно использовать в качестве тестовых задач, предназначенных для проверки адекватности и оценки точности численных методов решения задач, описываемых сильно нелинейными уравнениями математической физики.

Список литературы

1. Zaburdaev V.Yu., Smirnov V.V., Chukbar K.V. Nonlinear dynamics of electron vortex lattices // Plasma Physics Reports. 2014. V. 30. № 3. Pp. 214–217.
2. Аксенов А.В., Полянин А.Д. Групповой анализ, редукции и точные решения параболического уравнения Монжа–Ампера магнитной гидродинамики // Дифференциальный уравнения. 2024. Т. 60. № 6. С. 750–763.
3. Polyanin A.D., Aksenov A.V. Unsteady magnetohydrodynamics PDE of Monge–Ampère type: Symmetries, closed-form solutions and reductions // Mathematics. 2024. V. 12. № 13. 2127.
4. Polyanin A.D., Zaitsev V.F. Handbook of Nonlinear Partial Differential Equations, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
5. Polyanin A.D., Zhurov A.I. Separation of Variables and Exact Solutions to Nonlinear PDEs. Boca Raton: CRC Press, 2022.
6. Aksenov A.V., Polyanin A.D. Methods for constructing complex solutions of nonlinear PDEs using simpler solutions // Mathematics. 2021. V. 9. № 4. 345.
7. Аксенов А.В., Полянин А.Д. Обзор методов построения точных решений уравнений математической физики, основанных на использовании более простых решений // Теоретическая и математическая физика. 2022. Т. 211. № 2. С. 567–594.

А.Д. ПОЛЯНИН¹, Н.А. КУДРЯШОВ²

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ И РЕДУКЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА С ПОТЕНЦИАЛОМ И ДИСПЕРСИЕЙ ОБЩЕГО ВИДА

Исследуется нелинейное уравнение Шредингера общего вида, в котором дисперсия и потенциал задаются двумя произвольными функциями. Рассматриваемое уравнение является естественным обобщением широкого класса родственных нелинейных уравнений, которые часто встречаются в различных разделах теоретической физики, включая нелинейную оптику, сверхпроводимость и физику плазмы. Найдены точные решения нелинейного уравнения Шредингера общего вида, которые выражаются в квадратурах. Описаны одномерные редукции, приводящие исследуемое уравнение в частных производных к более простым обыкновенным дифференциальным уравнениям или системам таких уравнений. Специальное внимание уделено уравнениям, дисперсия которых задается степенной функцией. Полученные в данной работе точные решения могут использоваться в качестве тестовых задач, предназначенных для оценки точности численных методов интегрирования нелинейных уравнений математической физики.

A.D. POLYANIN¹, N.A. KUDRYASHOV²

¹ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

EXACT SOLUTIONS AND REDUCTIONS OF THE NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH POTENTIAL AND DISPERSION OF THE GENERAL FORM

The nonlinear Schrödinger equation of a general form is investigated, in which the dispersion and potential are given by two arbitrary functions. The equation under consideration is a natural generalization of a wide class of related nonlinear equations that are often encountered in various sections of theoretical physics, including nonlinear optics, superconductivity, and plasma physics. Exact solutions of the nonlinear Schrödinger equation of general form are found, which are expressed in quadratures. One-dimensional reductions are described, which reduce the studied partial differential equation to simpler ordinary differential equations or systems of such equations. Special attention is paid to equations whose dispersion is given by a power function. The exact solutions obtained in this work can be used as test problems intended to assess the accuracy of numerical methods for integrating nonlinear equations of mathematical physics.

Рассматривается нелинейное уравнение Шредингера общего вида

$$iu_t + [f(|u|)u]_{xx} + g(|u|)u = 0,$$

где $u = u(x,t)$ – искомая комплекснозначная действительных аргументов, $f(z)$ и $g(z)$ – произвольные действительные функции, i – мнимая единица. Данное уравнение является естественным обобщением широкого класса родственных нелинейных уравнений [1–5], которые часто встречаются в различных разделах теоретической физики, включая нелинейную оптику, сверхпроводимость и физику плазмы. Точные решения нелинейного уравнения Шредингера ищутся в виде $u = re^{i\varphi}$, где $r = r(x,t) \geq 0$ и $\varphi = \varphi(x,t)$ – действительные функции, подлежащие определению в ходе анализа. Далее, используя идеи метода функциональных связей, на амплитуду r последовательно накладывалось одно из четырех дополнительных соотношений:

$$\begin{aligned} r &= \text{const}, \\ r &= p(t), \\ r &= q(x), \\ r &= s(z), \quad z = ax - ct, \end{aligned}$$

где p, q, s – искомые функции, a, c – произвольные постоянные. В результате был найден ряд точных решений, которые выражаются в элементарных функциях или квадратурах [6], или описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями. Показано, что для получения точных решений родственных нелинейных уравнений Шредингера с постоянным запаздыванием можно использовать принцип структурной аналогии решений [7].

Список литературы

1. Kivshar Yu.S., Agrawal G.P. Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals. San Diego: Academic Press, 2003.
2. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics, 4th ed. New York: Academic Press, 2007.
3. Kudryashov N.A. Stationary solitons of the generalized nonlinear Schrödinger equation with nonlinear dispersion and arbitrary refractive index // Applied Mathematics Letters. 2022. V. 30. 107888.
4. Polyanin A.D., Zaitsev V.F. Handbook of Nonlinear Partial Differential Equations, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
5. Al Khawaja U., Al Sakkaf L. Handbook of Exact Solutions to the Nonlinear Schrödinger Equations. Bristol: IOP Publ., 2019.
6. Polyanin A.D., Kudryashov N.A. Closed-form solutions of the nonlinear Schrödinger equation with arbitrary dispersion and potential. // Chaos, Solitons & Fractals. 2025. V. 191. 115822.
7. Polyanin A.D., Kudryashov N.A. Nonlinear Schrödinger equations with delay: Closed-form and generalized separable solutions // Contemporary Mathematics. 2024. V. 5. № 4. 5763.

А.В. ПОРУБОВ

Институт Проблем Машиноведения, Санкт-Петербург, Россия

НЕЛИНЕЙНЫЕ УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАМАТЕРИАЛЕ

Из континуальных нелинейных уравнений деформации для модели метаматериала выведен ряд нелинейных уравнений Шредингера для описания модуляции волн деформации. Исследована возможность реализации ранее полученных точных решений этих уравнений. Показано, что генерация модулированных волн деформации может быть описана при помощи точных решений уравнений Шредингера в виде бегущей волны.

A.V. PORUBOV

Institute of Problems in Mechanical Engineering, Saint Petersburg, Russia

NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATIONS FOR MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN A METAMATERIAL

A number of nonlinear Schrodinger equations for describing the modulation of strain waves are derived from continuous nonlinear model equations for the strains in a metamaterial. The possibility of implementing previously obtained exact solutions of these equations is investigated. It is shown that the generation of modulated strain waves can be described using exact solutions of the Schrödinger equations in the form of a traveling wave.

Обычно метаматериалы рассматриваются в дискретном приближении на основании разностных уравнений решетки, которые в нелинейном приближении не решаются аналитически. Поэтому для анализа удобно использовать континуальный предел, приводящий к связанным дифференциальным уравнениям в частных производных для смещений или деформаций.

Однако, и эти связанные уравнения, как правило, не являются интегрируемыми. В отличие от дискретных уравнений, они обладают частными решениями в виде бегущей волны, которые существуют в ограниченном диапазоне параметров. Они могут описывать как периодические, так и локализованные волны.

Континуальные уравнения также могут быть решены с использованием асимптотических процедур. Одна из них заключается в поиске решения в виде модулированной волны. Его амплитудная часть удовлетворяет в простейшем случае нелинейному уравнению Шредингера (НУШ). В более общих случаях можно получить возмущенные уравнения Шредингера с возмущениями диссипативной и дисперсионной природы, а также нелинейными возмущениями.

В данной работе показано, как асимптотически вывести различные виды уравнений Шредингера для описания модуляции нелинейных волн. Проводится анализ коэффициентов выведенных уравнений на предмет существования ранее полученных точных решений. Показано, как предсказываемая частным решением НУШ модуляция волны реализуется при численном исследовании граничного возбуждения исходных связанных континуальных уравнений метаматериала.

Предварительные результаты получены в работах [1,2].

Список литературы

1. Porubov A.V., Bessonov N.M. //International Journal of Non-Linear Mechanics 167 (2024) 104922
2. Porubov A.V. // International Journal of Non-Linear Mechanics 137 (2021) 103788.

С.Ю. ДОБРОХОТОВ, В.Е. НАЗАЙКИНСКИЙ, А.В. ЦВЕТКОВА

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПУЧКИ БЕССЕЛЕВОГО ТИПА И ЛАГРАНЖЕВЫ МНОГООБРАЗИЯ

Рассматриваются асимптотические решения типа Бесселевых пучков трехмерного уравнения Гельмгольца, то есть решения, имеющие максимумы в окрестности оси z и описываемые на нормальных к ней плоскостях функциями Бесселя. Отметим, что энергия таких пучков оказывается неограниченной, в связи с чем появляется необходимость локализовать такие решения. Развиты подходы к локализации таких решений, основанные на их представлении в виде канонического оператора Маслова на подходящих лагранжевых многообразиях с простыми каустиками, имеющими вид вырожденных и невырожденных складок, а также получены эффективные формулы для указанных решений в виде специальных функций. Такой подход может также быть обобщен на случай решений волнового уравнения типа пучков Лагерра-Гаусса.

S.Yu. DOBROKHOTOV, V.E. NAZAIKINSKII, A.V. TSVETKOVA

Ishlinsky institute for problems in mechanics RAS, Moscow, Russia

LOCALIZED WAVE BEAMS OF BESSSEL TYPE AND LAGRANGIAN MANIFOLDS

Asymptotic solutions of the Bessel beam type of the three-dimensional Helmholtz equation are considered, i.e. solutions that have maxima in the vicinity of the z axis and are described on the planes normal to it by Bessel functions. Note that the energy of such beams turns out to be unlimited, which makes it necessary to localize such solutions. Approaches to localizing such solutions based on their representation in the form of the Maslov canonical operator on suitable Lagrangian manifolds with simple caustics in the form of degenerate and nondegenerate folds are developed. Effective formulas for these solutions in terms of special functions are obtained. This approach can also be generalized to the case of solutions of the wave equation of the Laguerre-Gauss beam type.

Рассматривается подход к построению асимптотических решений трехмерного уравнения Гельмгольца в виде локализованных пучков. К примеру, пучки Бесселя (имеющие максимумы в окрестности оси z и описываемые на нормальных к ней плоскостях функциями Бесселя) являются решениями такого уравнения. Однако энергия таких решений неограничена. Чтобы энергия стала ограниченной, можно локализовать пучок.

Один из подходов к локализации пучка заключается в следующем. Разобьем уравнение Гельмгольца на два и рассмотрим “начальное” условие при $z=0$ в виде канонического оператора Маслова от локализованной функции на лагранжевом многообразии, определяющем функцию Бесселя. Такое лагранжево многообразие некомпактно, однако, если рассмотреть финитную функцию на нем, то канонический оператор определит локализованное начальное условие. Далее, опираясь на метод канонического оператора и сдвигая начальное лагранжево многообразие вдоль траекторий гамильтоновой системы с гамильтонианом, определяемым символом соответствующего оператора, мы получим лагранжево многообразие для произвольного z . Канонический оператор на этом лагранжевом многообразии определяет асимптотику локализованного решения уравнения Гельмгольца. При этом, учитывая тип особенности на лагранжевом многообразии, можно получить представление для канонического оператора (а, значит, и локализованного пучка) в виде линейной комбинации функций Бесселя.

Имеется также другой подход к локализации пучков Бесселя, основанный на использовании компактных лагранжевых многообразий. Для начала мы иллюстрируем этот подход на примере пучков Лагерра-Гаусса, используя параксиальное приближение и параксиальное уравнение Гельмгольца. Асимптотику таких пучков также можно получить методом канонического оператора. Начальное условие при $z=0$ представляется в виде канонического оператора от единицы на компактном лагранжевом многообразии. В отличие от предыдущего случая, помимо особенности в виде вырожденной складки (соответствующей функции Бесселя), это лагранжево многообразие имеет также особенность типа невырожденной складки (соответствующей функции Эйри). Вновь сдвигая начальное многообразие вдоль траекторий соответствующей гамильтоновой системы, мы получаем лагранжево многообразие для произвольного z . При этом это многообразие имеет особенности того же типа, что и начальное. Канонический оператор от единицы на полученном лагранжевом многообразии дает асимптотику пучка Лагерра-Гаусса для произвольного z , для которой можно получить глобальное представление в виде функции Бесселя и Эйри.

Этот подход можно применить и для исходного уравнения Гельмгольца, отказавшись от параксиального приближения, а также для построения асимптотики решения волнового уравнения типа пучков Лагерра-Гаусса.

Список литературы

1. Доброхотов С.Ю., Назайкинский В.Е., Цветкова А.В. // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68, № 6. С. 527–541.
2. Tsvetkova A.V. // Regular and Chaotic Dynamics. 2024. Vol. 29, № 6. P. 866–885.

Б.В. ВЕДЕНИЯПИН, Я.Г.Батищева, Н.Н. Фимин, В.М. Чечёткин.
ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

МАТЕМАТИКА ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КОСМОЛОГИЯ: УРАВНЕНИЯ ВЛАСОВА И КОНСТАНТА ХАББЛА

Рассмотрены вывод и свойства уравнений Власова-Эйнштейна и Власова-Пуассона и космологические решения.

V.V. VEDENYAPIN, N.N. FIMIN, V.M. CHECHETKIN, A.A. RUSSKOV

Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

On Vlasov-type equations, cosmological solutions and expanding of Universe.

We consider derivation and properties of Vlasov-Einstein and Vlasov-Poisson equations and cosmological solutions.

В классических работах (см. [1–4]), уравнения для полей предлагаются без вывода правых частей. Здесь мы даем вывод правых частей уравнений Максвелла и Эйнштейна в рамках уравнений Власова–Максвелла–Эйнштейна из классического, но немного более общего принципа наименьшего действия [5–11]. Получающийся вывод уравнений типа Власова даёт уравнения Власова-Эйнштейна отличные от того, что предлагались ранее [12–15]. Предлагается способ перехода от кинетических уравнений к гидродинамическим следствиям [5–8], как это делалось раньше уже самим А.А. Власовым [4]. В случае гамильтоновой механики от гидродинамических следствий уравнения Лиувилля возможен переход к уравнению Гамильтона-Якоби, как это делалось уже в квантовой механике Е. Маделунгом [16], а в более общем виде В.В.Козловым [17–18]. Таким образом получаются в нерелятивистском случае решения Милна–Маккри, а также нерелятивистский и релятивистский анализ решений типа Фридмана нестационарной эволюции Вселенной. Это позволяет определить константу Хаббла не на основе метрики, как это делалось ранее [1–3], а как положено, на основе наблюдаемой материи, написать уравнения для нее на основе движения материи в заданной метрике, проанализировать Лямбду Эйнштейна и причину ускоренного расширения Вселенной как релятивистский эффект [19–20].

Список литературы

1. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: ЛКИ, 2007.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.
3. Вейнберг С. Гравитация и космология. М.: Мир, 1975, 696 стр.
4. Власов А.А. Статистические функции распределения. М.: Наука, 1966. 356 стр.
5. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и МГД. Тождество Лагранжа и форма Годунова // Теоретическая и математическая физика. ---2012. Т. 170. № 3. С. 468–480.
6. Веденяпин В.В., Негматов М.-Б. А., Фимин Н.Н. Уравнения типа Власова и Лиувилля, их микроскопические, энергетические и гидродинамические следствия. Изв. РАН. Сер. матем. 2017. Т. 81. № 3. С. 45–82.
7. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и магнитной гидродинамики. Тождество Лагранжа, форма Годунова и критическая масса. СМФН, 2013, том 47, С. 5–17.
8. Веденяпин В.В. Кинетические уравнения Больцмана и Власова. М.: Физматлит, 2001.
9. Веденяпин В.В. Уравнение Власова-Максвелла-Эйнштейна // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 188. 20 с.
10. Vedenyapin V.V., Fimin N.N., Chechetkin V.M. The system of Vlasov–Maxwell–Einstein-type equations and its nonrelativistic and weak relativistic limits // International Journal of Modern Physics D, 2020. V. 29. № 1. 23 p.
11. Vedenyapin, V., Fimin, N., Chechetkin, V. The properties of Vlasov–Maxwell–Einstein equations and its applications to cosmological models // European Physical Journal Plus. 2020. № 400. 14 c.
12. Cercignani C., Kremer G.M. The relativistic Boltzmann Equation: theory and applications. Boston, Basel, Berlin: Birghause, 2002.
13. Choquet-Bruhat Y., . Introduction to general relativity, black holes and cosmology. New York: Oxford University Press. 2015.
14. Rein G., Rendall A.D. Global existence of solutions of the spherically symmetric Vlasov-Einstein system with small initial data, Commun. Math. Phys. 150, 561–583, (1992).
15. Kandrup H.E., Morrison P.J. Hamiltonian structure of the Vlasov–Einstein system and the problem of stability for spherical relativistic star clusters // Ann. Phys. 1993. V. 225. P. 114–166.
16. Madelung E. Quantentheorie in hydrodynamischer form (Quantum theory in hydrodynamic form), Z Phys, 40 (1926), 322–326.
17. Козлов В. В. Гидродинамика гамильтоновых систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1 Матем. Мех., 1983, № 6, 10–22;
18. Козлов В. В., Общая теория вихрей, Изд-во Удмуртского ун-та, Ижевск, 1998, 239с.
19. Веденяпин В.В., МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ. ЖУРНАЛ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ, 2024, том 64, № 11, с. 2110–2127. Vedenyapin V.V., Mathematical Theory of the Expanding Universe Based on the Principle of Least Action. Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2024, Vol. 64, No. 11, pp. 2624–2642. © Pleiades Publishing, Ltd., 2024.
20. В. В. Веденяпин, В. М. Аушев, А. О. Гладков, Ю. А. Измайлова, А. А. Реброва, “Математическая теория ускоренного расширения Вселенной на основе принципа наименьшего действия и модели Фридмана и Милна-Маккри”, Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2024, 003, 28 стр.

В.Г. СОРОКИН

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРЯМЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В УСЛОВИЯХ НЕУСТОЙЧИВОГО СТАЦИОНАРНОГО РЕШЕНИЯ

Метод прямых позволяет свести начально-краевую задачу для нелинейного уравнения в частных производных с запаздыванием к задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений с запаздыванием, которая решается неявными методами Рунге – Кутты или Гира. Показано, что метод применим в том числе при значениях параметров, соответствующих неустойчивому стационарному решению. Полученное численное решение можно считать адекватным на том временном интервале, где решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с запаздыванием, полученные разными методами, совпадают.

V.G. SOROKIN

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

APPLICATION OF THE METHOD OF LINES FOR NUMERICAL INTEGRATION OF NONLINEAR DELAY PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS UNDER CONDITIONS OF AN UNSTABLE STATIONARY SOLUTION

The method of lines reduces the initial-boundary value problem for a nonlinear delay partial differential equation to a problem for a system of delay ordinary differential equations, solved by implicit Runge–Kutta or Gear methods. It is shown that the method is applicable even for parameter values corresponding to an unstable stationary solution. The obtained numerical solution can be considered adequate within the time interval where the solutions of the system of delay ordinary differential equation obtained by different methods coincide.

Метод прямых заключается в сведении начально-краевой задачи для уравнения в частных производных с запаздыванием к задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с запаздыванием. Полученная система чаще всего оказывается жесткой, и ее решение необходимо вести неявными методами, например Рунге – Кутты или Гира. Работоспособность метода была продемонстрирована в [1] на многих тестовых задачах. Важно, что метод применим при значениях параметров задачи, соответствующих неустойчивому стационарному решению. В этом случае численное решение задачи можно считать адекватным на том временном интервале, где решения системы ОДУ, полученные различными методами, совпали друг с другом.

Рассмотрим тестовую задачу для нелинейного реакционно-диффузационного уравнения с запаздыванием

$$u_t = u_{xx} - 8u + 8(1 - e^{-0.7})^{-2}(u - e^{-0.7}w)^2, \quad w = u(x, t - 0.1), \quad (1)$$

с начальными данными

$$u(x, t) = 1 + e^{-7t+1}(e^2 - 1)^{-1}(e^x - e^{-x}), \quad -0.1 \leq t \leq 0, \quad (2)$$

и граничными условиями

$$u(0, t) = 1, \quad t > 0, \quad u(1, t) = 1 + e^{-7t}, \quad t > 0, \quad (3)$$

которая в области $0 \leq x \leq 1$, $t > 0$ имеет точное решение вида (2).

Можно показать, что стационарное решение $u_0 = 1$ уравнения (1), к которому асимптотически при $t \rightarrow \infty$ стремится решение (2), является неустойчивым.

На рис. 1 изображены точное решение (2) (сплошная линия) и численные решения, полученные методом прямых в совокупности с неявными методами Рунге – Кутты второго (кружочки) и четвертого (треугольнички) порядка и Гира (крестики) при $x = 0.5$. Видно, что на временном интервале, где решения, полученные разными методами, совпали между собой, они также совпали и с точным решением.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012500440-9).

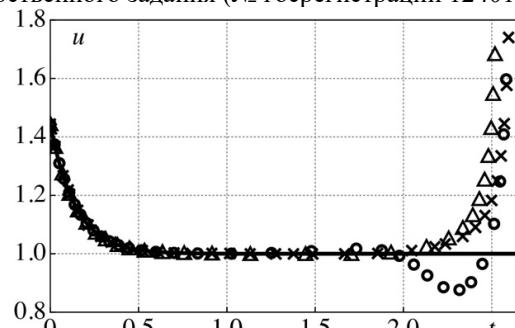


Рис. 1. Точное решение (сплошная линия) и численные решения (метод Рунге – Кутты второго порядка – кружочки, метод Рунге – Кутты четвертого порядка – треугольнички, метод Гира – крестики) тестовой задачи (1) – (3) при $x = 0.5$

Список литературы

1. Polyanin A.D., Sorokin V.G., Zhurov A.I. Delay ordinary and partial differential equations. Boca Raton: CRC Press, 2024.

З.Н. ХАКИМОВА¹, О.В. ЗАЙЦЕВ²

¹Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

²БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

ДИСКРЕТНЫЕ СИММЕТРИИ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДРОБНО-ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ВИДА В ТРАНСЦЕНДЕНТАХ ПЕНЛЕВЕ

Исследуются дискретные симметрии уравнений Пенлеве. Построены дискретные группы преобразований уравнений Пенлеве, замкнутых в классе обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка с дробно-полиномиальными правыми частями. Найдены орбиты уравнений Пенлеве в этом классе уравнений. Вычислены точные решения элементов орбит уравнений Пенлеве.

Z.N. KHAKIMOVA¹, O.V. ZAITSEV²

¹Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia

²BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia

DISCRETE SYMMETRIES AND EXACT SOLUTIONS OF THE FRACTIONAL POLYNOMIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS THROW PAINLEVE TRANSCENDENTS

Discrete symmetries of Painleve equations are investigated. Discrete groups of transformations of the Painleve equations are built, closed in the class of the 2nd order ordinary differential equations with fractional polynomial right-wing parts. The orbits of the Painleve equations in this class of equations were found. The exact solutions of the elements of the orbits of the Painleve equations are calculated.

Уравнения Пенлеве замечательны тем, что их общие решения – специальные функции, называемые в последнее время трансцендентами Пенлеве (раньше так называли сами уравнения Пенлеве) – не имеют подвижных критических особых точек [1, 2]. Уравнения Пенлеве имеют большое теоретическое и прикладное значение, особенно в математической физике (например, [1-5]). Применён метод вложения: уравнения Пенлеве «вложены» в класс обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка с дробно-полиномиальными правыми частями [6]. Методами дискретно-группового анализа [7] найдены дискретные группы и псевдогруппы преобразований уравнений Пенлеве, замкнутых в классе дробно-полиномиальных уравнений; построены графы этих групп [6, 8-11]. С помощью метода «размножения» разрешимых случаев по известной дискретной группе преобразований получены элементы орбит уравнений Пенлеве полиномиального и дробно-полиномиального вида, а также их точные решения, основываясь на следующем факте: решения различных уравнений связаны теми же самыми преобразованиями, что и сами уравнения. Получены формулы, позволяющие автоматизировать процесс вычисления решений элементов орбит уравнений Пенлеве [6]. Найдено преобразование, масштабирующее коэффициенты элементов орбит 1-го и 2-го уравнений Пенлеве [6,8]. Найдено степенное преобразование, «масштабирующее» показатели при переменных в элементах орбит уравнений Пенлеве [10, 11].

Список литературы

1. Painleve P. Sur les equations differentielles du second ordre et d'ordre superieur, dont l'integrale generale est uniforme // Acta Math. – 1902. – Vol. 25. – P. 1-86.
2. Polyanin A. D., Zaitsev V. F. Handbook of Ordinary Differential Equations: Exact Solutions, Methods, and Problems. – CRC Press. Boca Raton – London, 2018.
3. Н.А. Кудряшов. Методы нелинейной математической физики. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 368 с.
4. Конт Р. Метод Пенлеве и его приложения / Р. Конт, М. Мицетт. – М.: Ин-т компьютер. исслед.; Ижевск: Регуляр. и хаотич. динамика, 2011. – 315 с.
5. A. S. Fokas, A. R. Its, A. A. Kapaev, and V. Yu. Novokshenov (2006) Painlevé Transcendents: The Riemann-Hilbert Approach. Mathematical Surveys and Monographs, Vol. 128, American Mathematical Society, Providence, RI.
6. Хакимова З. Н., Зайцев О. В. Дробно-полиномиальные дифференциальные уравнения: дискретные группы и решения через трансцендент 1-го уравнения Пенлеве // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2021. – N 1(4). – С. 62-92.
7. Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по нелинейным дифференциальным уравнениям. Приложения в механике, точные решения. – М.: Наука, 1993. – 464с.
8. Хакимова З. Н., Тимофеева Л.Н., Зайцев О. В. Решения в полиномах дробно-полиномиальных дифференциальных уравнений, порожденных вторым уравнением Пенлеве // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2021. – N 3(7). – С. 141-152.
9. Хакимова З. Н. Решения полиномиальных и экспоненциальных дифференциальных уравнений в квадратурах и через 3-й трансцендент Пенлеве // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Секция: Дифференциальные уравнения и их приложения. – Воронеж, 2022. – С. 132–135.
10. Хакимова З. Н. Расширение группы дизэдра для 4-го уравнения Пенлеве с помощью степенного преобразования // Перспективы науки. – Тамбов: ТМБпринт. – 2021. – № 11 (146). – С. 45-53.
11. Хакимова З. Н., Тимофеева Л.Н., Атоян А. А. Применение степенного преобразования к орбите 2-го уравнения Пенлеве и решение дифференциальных уравнений с полиномиальными правыми частями через 2-й трансцендент Пенлеве и в полиномах // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2023. – N 4. – С. 142-154.

Е.П. КУБЫШКИН

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

БИФУРКАЦИИ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ С ОПЕРАТОРОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АРГУМЕНТА И ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В НЕЛИНЕЙНОМ ФУНКЦИОНАЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Рассматривается математическая модель генератора оптического излучения с оператором преобразования пространственных координат и запаздыванием в нелинейном контуре обратной связи. Рассмотрены два вида оператора преобразования пространственных координат - оператор поворота и оператор растяжения. Показано, что наличие запаздывания в контуре обратной связи может привести к генерации устойчивых периодических пространственно-неоднородных оптических волн.

E.P. KUBYSHKIN

P.G. Demidov State University, Yaroslavl, Russia

BIFURCATIONS OF SELF-OSCILLATING SOLUTIONS IN A PARABOLIC EQUATION WITH A SPATIAL ARGUMENT TRANSFORMATION OPERATOR AND A LAG IN A NONLINEAR FEEDBACK FUNCTIONAL

Considers a mathematical model of an optical radiation generator with a spatial coordinate transformation operator and a delay in a nonlinear feedback loop. Two types of spatial coordinate transformation operators are considered: the rotation operator and the stretch operator. It is shown that the presence of a delay in the feedback loop can lead to the generation of stable periodic spatially inhomogeneous optical waves.

Для функционально-дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом

$$u_t(\rho, \varphi, t) + u = D\Delta_{\rho\varphi}u(\rho, \varphi, t) + Q(u(\rho, \varphi, t - T)) \quad (1)$$

относительно функции $u(\rho, \varphi, t + s)$, заданной в полярных координатах $0 \leq \rho \leq R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi (R > 0)$ и $t \geq 0, -T \leq s \leq 0 (T > 0)$, в котором $\Delta_{\rho\varphi}$ - оператор Лапласа в полярных координатах, $Q(u(\rho, \varphi, t))$ - нелинейный функционал обратной связи с оператором преобразования пространственных координат, $D, K > 0$ (K - коэффициент усиления), в области $\bar{K}_R \times R^+$, где круг $\bar{K}_R = \{(\rho, \varphi): 0 \leq \rho \leq R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi\}$, $R^+ = \{t: 0 \leq t < \infty\}$, рассматривается начально-краевая задача вида

$$u_\rho(R, \varphi, t) = 0, \quad u(\rho, 0, t) = u(\rho, 2\pi, t), \quad u_\varphi(\rho, 0, t) = u_\varphi(\rho, 2\pi, t), \quad u(\rho, \varphi, t + s)|_{t=0} = u_0(\rho, \varphi, s) \in H_0(K_R; -T, 0). \quad (2)$$

В (1), (2) пространство начальных условий $H_0(K_R; -T, 0) = \{u(\rho, \varphi, s): u(\rho, \varphi, s) \in C(\bar{K}_R \times [-T, 0]), u_\rho(R, \varphi, s) = 0, u(\rho, 0, s) = u(\rho, 2\pi, s), u_\varphi(\rho, 0, s) = u_\varphi(\rho, 2\pi, s)\}$, при каждом s $u(\rho, \varphi, s) \in H^2(K_R) \subset W_2^2(K_R)$, где $W_2^2(K_R)$ – пространство Соболева.

Начально-краевая задача (1), (2) (при $T = 0$) предложена в [1] в качестве математической модели нелинейной оптической системы, нелинейность в которой обеспечивается тонким слоем нелинейной проводящей среды с контуром двумерной обратной связи, содержащей оператор пространственного преобразования световой волны в плоскости излучения оптического генератора. Учет временного запаздывания ($T > 0$) в контуре обратной связи приводит к новым динамическим эффектам. Рассмотрены два вида функционала $Q(\cdot)$:

$$Q(u(\rho, \varphi, t)) \equiv (1 + \gamma \cos(u_\theta(\rho, \varphi, t))), \quad u_\theta(\rho, \varphi, t) \equiv u(\rho, \varphi + \theta, t) \bmod(2\pi) \quad (0 \leq \theta < 2\pi), \quad (3)$$

с оператором поворота пространственного аргумента, и

$$Q(u(\rho, \varphi, t)) \equiv \alpha^{-2}(1 + \gamma \cos(u(\rho/\alpha, \varphi, t))) \quad (\alpha > 1), \quad 0 \leq \rho \leq R, \quad (4)$$

с оператором растяжения пространственного аргумента, где $0 < \gamma < 1$.

Для начально-краевой задачи (1), (2) с функционалами (3), (4) исследуются условия и характер потери устойчивости однородными состояниями равновесия и обусловленные потерей устойчивости бифуркации пространственно-неоднородных автоколебательных решений, а также их устойчивость. Показана возможность колебательной потери устойчивости состояниями равновесия и бифуркации устойчивых ротационных и спиральных волн.

Список литературы

1. Ахманов С.А., Воронцов М.А., Иванов В.Ю // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47, № 12. С. 611–614.

М.В. ГАСАНОВ, В.Н. ОРЛОВ

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ ТЕСТИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОСНОВАННОЙ НА НЕЛИНЕЙНОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ УРАВНЕНИИ

Рассмотрен один из методов верификации математических моделей на примере нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения, основанный на численном показателе качества модели. Имея экспериментальные данные и решая обратную задачу, авторами была получена соответствующая математическая модель рассматриваемого процесса. С помощью данной модели можно спрогнозировать дальнейшее поведение рассматриваемого процесса там, где исследования еще не проводились.

M.V. GASANOV, V.N. ORLOV

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ABOUT ONE VARIANT OF TESTING A MATHEMATICAL MODEL BASED ON A NONLINEAR DIFFERENTIAL EQUATION

One of the methods of verification of mathematical models is considered using the example of a nonlinear ordinary differential equation based on a numerical quality indicator. Having experimental data and solving the inverse problem, the authors obtained an appropriate mathematical model of the process under consideration. With the help of this model, it is possible to predict the further behavior of the process under consideration where studies have not yet been conducted.

Как показывает практика, математические модели, описывающие тот или иной процесс чаще всего, возникают естественным путем, но иногда применяются математические модели, которые не имеют обоснования принадлежности к рассматриваемому процессу. Предлагаемая авторами технология верификации, позволяет восполнить этот пробел и практически позволяет проводить исследования процессов с помощью математических моделей, основанных на нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнениях и уравнениях с дробными производными. Адекватность математической модели к исследуемому процессу связана с численным показателем качества модели. Идея подхода заключается в следующем: имея экспериментальные данные некоторого процесса и интерпретируя данный процесс с помощью нелинейного дифференциального уравнения, можно для набора исходных данных получить численную величину, характеризующую качество рассматриваемой модели для описания исследуемого процесса.

В качестве примера рассматривается распределение давления в нефтегазовом пласте на основе экспериментальных данных, полученных путем гидродинамических исследований в окрестности скважины [1]. Математическую модель, соответствующую данному процессу, будем искать в виде:

$$y'''(x) = y^n(x) + r(x), \text{ при } n = 2, 7, \quad (1)$$

с начальными условиями

$$y^{(j)}(x_0) = y_j, j = 0, 1, 2. \quad (2)$$

Использование в качестве математической модели задачи (1) – (2) обусловлено тем, что авторами был полностью исследован данный класс уравнений [2], [3]. Используя экспериментальные данные из работы [1] и теоретические результаты из работ [2] и [3], решаем обратную задачу и получаем нелинейные дифференциальные уравнения:

$$y'''(x) = y^2 - 0.218 - 0.657x + 0.122x^2 + 0.134x^3 - 0.098x^4 + 0.023x^5 - 0.003x^6, \quad (3)$$

для случая $n = 2$, и

$$y'''(x) = y^7 - 0.201 - 0.451x + 0.627x^2 + 0.092x^3 - 0.376x^4 + 0.039x^5 - 0.208x^6, \quad (4)$$

для случая $n = 7$, с начальными условиями

$$y(0.2) = 0.731, y'(0.2) = 0.446, y''(0.2) = -0.449. \quad (5)$$

Решая прямую задачу Коши (3), (5), получаем аналитическое приближенное решение с численным показателем $R^2 = 0.990893$, а для задачи Коши (4) – (5) $R^2 = 0.990895$. Полученные численные значения показателя качества модели свидетельствуют о хорошей согласованности экспериментальных данных с полученным аналитическим приближенным решением и обосновывает применение данного нелинейного дифференциального уравнения для распределения давления в нефтегазовом пласте для рассматриваемой области.

Список литературы

1. Алероев Т.С., Хворова А.Н. // Математическая модель идентификации параметра дробной производной и прогнозирования результатов для уравнения движения жидкости в скважине // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. №-2 (48). С.~72–79.
2. Orlov V.N, Gasanov M.V. // Existence and Uniqueness Theorem for a Solution to a Class of a Third-Order Nonlinear Differential Equation in the Domain of Analyticity // Axioms. 2022. Vol. 11. No 5.
3. Орлов В. Н., Ковалчук О. А., и др. Исследование одного класса нелинейного дифференциального уравнения третьего порядка в области аналитичности// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. с. Естественные науки. 2018. № 4(79). С. 24-35.

С.Ф. ЛАВРОВА, Н.А. КУДРЯШОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПАРЫ ЛАКСА И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ РЕДУКЦИЙ УРАВНЕНИЙ ИЕРАРХИИ ГАРРИ ДИМА К ПЕРЕМЕННЫМ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Рассматриваются дифференциальные уравнения третьего, пятого и седьмого порядков из иерархии Гарри Дима и их редукции к переменным бегущей волны. Для каждого из этих уравнений получена пара Лакса, что позволяет записать их первые интегралы. Общее решение уравнения Гарри Дима третьего порядка найдено с использованием метода неявной функции. На основе первых интегралов уравнений пятого и седьмого порядков получены ограничения на параметры и константы интегрирования, при которых решение уравнения третьего порядка удовлетворяет уравнениям высших порядков.

S.F. LAVROVA, N.A. KUDRYASHOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

LAX PAIRS AND EXACT SOLUTIONS FOR THE TRAVELING WAVE REDUCTION OF THE HARRY DYM HIERARCHY

The third, fifth and seventh partial differential equations from the Harry Dym hierarchy and their traveling wave reductions are considered. A Lax pair is obtained for each equation to write their first integrals. A general solution of the third-order Harry Dym equation has been obtained by the implicit function method. Employing the first integrals of the fifth and seventh order equations, parameter and integration constant restrictions are obtained at which the solution of the third-order equation obeys the higher-order equations.

В данной работе исследуются нелинейные обыкновенные дифференциальные уравнения третьего, пятого и седьмого порядков. Эти уравнения можно записать в следующем виде:

$$y_{zzz} + \frac{C_0 y_z}{y^3} = 0. \quad (1)$$

$$y_{zzzzz} + \frac{5y_z y_{zzzz}}{y} + \frac{5y_{zz} y_{zzz}}{y} + \frac{5y_z^2 y_{zzz}}{2y^2} + \frac{C_0 y_z}{y^5} = 0. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} y_{zzzzzz} + \frac{14y_z y_{zzzzz}}{y} + \frac{105y_z^2 y_{zzzz}}{2y^2} + \frac{105y_{zz} y_{zzzz}}{y^2} + \frac{21y_{zzz} y_{zzzz}}{y} + \frac{21y_{zz} y_{zzzz}}{y} + \frac{63y_z^2 y_{zzz}}{2y^2} + \frac{42y_z y_{zz} y_{zzz}}{y^2} \\ + \frac{63y_z^4 y_{zzz}}{8y^4} + \frac{105y_z^3 y_{zzz}}{2y^3} + \frac{147y_z^2 y_{zz} y_{zzz}}{2y^3} + \frac{C_0 y_z}{y^7} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В ходе выполнения работы показывается, что уравнения (1), (2) и (3) являются интегрируемыми дифференциальными уравнениями, которые соответствуют редукциям к переменным бегущей волны дифференциальных уравнений в частных производных из иерархии Гарри-Дайма. Для каждого уравнения с использованием схемы АКНС [1] построена пара Лакса, что подтверждает их интегрируемость. В результате построения пар Лакса для каждого исследуемого уравнения записаны их первые интегралы. Общее решение уравнения третьего порядка иерархии находится с использованием метода неявной функции. Первые интегралы уравнений высших порядков используются для получения ограничений на интеграционные константы и параметры, при которых общее решение уравнения третьего порядка удовлетворяет уравнениям более высоких порядков.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. Ablowitz M.J., Kaup D.J., Newell A.C., Segur H. // Stud. Appl. Math. 1974. Vol. 53, No. 4. P. 249–315.

К.В. БРУШЛИНСКИЙ^{1,2}, В.В. КРЮЧЕНКОВ², Е.В. СТЁПИН^{1,2}

¹Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СТРОГОГО РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В ДВУМЕРНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШЕК

Исследованы вопросы устойчивости равновесных плазменных конфигураций в магнитных ловушках относительно малых возмущений. Конкретно рассмотрены двумерные математические модели магнитных ловушек на примере ловушки «Пояс» из класса галатей, предложенных А. И. Морозовым. Конфигурации оказались устойчивы относительно двумерных возмущений в классическом смысле Ляпунова, однако было определено, что характер устойчивости связан с плотностью плазмы: с уменьшением плотности на внешней границе конфигурации возмущения скорости могут достигать сколь угодно больших значений. В случае трёхмерных возмущений конфигурации неустойчивы, а скорость и начало экспоненциального роста связаны с частотой фурье-гармоник возмущений.

K.V. BRUSHLINSKII^{1,2}, V.V. KRIUCHENKOV², E.V. STEPIN^{1,2}

¹Federal Research Center Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ON THE STABILITY OF STRICT EQUILIBRIUM OF PLASMA IN TWO-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODELS OF MAGNETIC TRAPS

The issues of stability of equilibrium plasma configurations in magnetic traps with respect to small perturbations are investigated. Two-dimensional mathematical models of magnetic traps are considered specifically on the example of the "Belt" trap from the Galatea class proposed by A. I. Morozov. The configurations turned out to be stable with respect to two-dimensional perturbations in the classical Lyapunov sense but it was determined that the character of stability is related to the plasma density: as the density at the outer boundary of the configuration decreases, the velocity perturbations can reach any large values. In the case of three-dimensional perturbations, the configurations are unstable, and the rate and the onset of exponential growth are related to the Fourier-harmonic frequency of the perturbations.

Вопросы устойчивости представляют большой интерес в прикладных задачах программ управляемого термоядерного синтеза. Исследование устойчивости посредством построения математических моделей конфигураций плазмы и расчётов их возмущений представляется эффективным и ресурсоёмким. Тут рассматривается двумерная модель магнитоплазменных конфигураций в случае их строгого идеализированного равновесия, которая строится решением краевой задачи с уравнением Грэда-Шафранова. Эта идеализация модели влечёт за собой недоопределённость, поскольку решение задачи и уравнение состояния позволяют определить лишь две из трёх термодинамических величин: температуры, энтропии и плотности. Оставшаяся функция задаётся из каких-либо физических соображений. Типичным вариантом является задание плотности быстро убывающей к границам ловушки с целью их изоляции от плазмы.

В случае двумерных возмущений экспоненциальный рост во времени отсутствует, что означает устойчивость в смысле Ляпунова. Однако с убыванием плотности равновесных конфигураций возмущения скорости растут и, в случае типичного убывания плотности до нуля к границам ловушки, они достигают сколь угодно больших значений. Это явление, по-видимому, также является проявлением некой неустойчивости, но, во-первых, не в общеупотребимом смысле, во-вторых, оно проявляется себя в области фактически отсутствия плазмы и потому не представляется опасным для равновесия. Исследована зависимость устойчивости от поведения плотности плазмы. Рассмотрены варианты плотности, связанные с изэнтропичностью и температурой плазменных конфигураций: "горячая" (постоянная температура) и "холодная" (быстро убывающая к границам температура) плазма, а также промежуточный вариант между ними. Расчёты показали, что случай "холодной" плазмы более устойчив чем случай "горячей", то есть в той же геометрической области значения возмущений скорости меньше по величине. Любопытным представляется то, что во всех расчётах с уменьшением плотности на границе конфигураций увеличиваются возмущения только скорости. Возмущения давления, магнитного поля и потока массы остаются практически неизменными с уменьшением плотности и сосредоточены в центре конфигураций. Это ещё раз демонстрирует факт устойчивости в привычном понимании. Далее исследовалось поведение трёхмерных возмущений. Установлено, что они экспоненциально растут со временем, а скорость и начало этого роста зависит от частоты возмущений. Таким образом исследуемые конфигурации оказались неустойчивы относительно трёхмерных возмущений в общепринятом смысле Ляпунова.

Содержание доклада только что опубликовано авторами в статье в «Докладах РАН. Математика, информатика, процессы управления.», 2024, том 519, с. 3-7.

Д.Р. НИФОНТОВ, Н.А. КУДРЯШОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ФУНКЦИЯ ГРИНА ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ДИССИПАТИВНОГО ЛИНЕЙНОГО ЭВОЛЮЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОРЯДКА

Рассматривается задача Коши для диссипативного линейного эволюционного уравнения произвольного порядка. Найдена функция Грина исследуемой задачи Коши. Задача по построению функции Грина сведена к вычислению интеграла. Получено представление функции Грина в виде ряда. Ряд сведен к конечной сумме гипергеометрических функций. Рассматриваемые гипергеометрические функции имеют фиксированные параметры числителя и знаменателя. Построены решения диссипативных линейных эволюционных уравнений при $n = 2, 4, 6$.

D.R. NIFONTOV, N.A. KUDRYASHOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

GREEN'S FUNCTION OF THE CAUCHY PROBLEM FOR A DISSIPATIVE LINEAR EVOLUTION EQUATION OF ARBITRARY ORDER

The Cauchy problem for a dissipative linear evolution equation of arbitrary order is considered. The Green function of the Cauchy problem under study is found. The problem of constructing the Green function is reduced to calculating the integral. A representation of the Green function in the form of a series is obtained. The series is reduced to a finite sum of hypergeometric functions. The hypergeometric functions under consideration have fixed parameters of the numerator and denominator. Solutions of the dissipative linear evolution equation for $n = 2, 4, 6$ are constructed.

Рассматривается задача Коши для диссипативного линейного эволюционного уравнения произвольного порядка, имеющего вид

$$\begin{cases} \Psi_t + \alpha_n \Psi_{n+1,x} = 0, & -\infty < x < +\infty, \quad 0 < t, \\ \Psi(x, 0) = \phi(x). \end{cases}$$

Показано [1], что в случае диссипативных уравнений при $\alpha_n = (-1)^m a^2, a \in \mathbb{R}, n = 2m - 1, m \in \mathbb{N}$ существует решение задачи в виде

$$\Psi(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_{2m-1}(x, \xi, t) \phi(\xi) d\xi,$$

где $G_{2m-1}(x, \xi, t)$ – функция Грина определяется формулой

$$G_{2m-1}(x, \xi, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega x - a^2 \omega^{2m} t} d\omega$$

Одной из ключевых задач работы является нахождение явного вида функции Грина.

При $\xi = 0$ получено представление функции Грина в виде ряда

$$G_{2m-1}(x, 0, t) = \frac{1}{2\pi m^{2m} \sqrt{a^2 t}} \sum_{\beta=0}^{\infty} \frac{(-z^{2m} \sqrt{2m})^\beta \left(\frac{\beta}{m} + \frac{1}{2m}\right)}{(2\beta)!}, \quad z = \frac{x}{\sqrt{2ma^2 t}}$$

Используя формулу умножения Гаусса для Гамма-функции и свойство гипергеометрических функций, получено представление функции Грина в форме конечной суммы гипергеометрических функций вида ${}_1F_{2m-1}$

$$\frac{(2\pi)^{\frac{2m-1}{2}}}{\pi(2m)^{\frac{3}{2}2m} \sqrt{a^2 t}} \sum_{l=0}^{m-1} \left(-z^2 (2m)^{\frac{1}{m}-2}\right)^l \prod_{\gamma=2}^{2m} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{l}{m} + \frac{\gamma}{2m}\right)} {}_1F_{2m-1}\left([1]; \left[\frac{l}{m} + \frac{2}{2m}, \frac{l}{m} + \frac{3}{2m}, \dots, \frac{l}{m} + \frac{2m}{2m}\right], 2m \left(\frac{-z^2}{4m^2}\right)^m\right),$$

где $z = \frac{x}{\sqrt{2ma^2 t}}$.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. Kudryashov, N.A., Sinelshchikov, D.I. The Cauchy problem for the equation of the Burgers hierarchy. Nonlinear Dyn 76, 561–569 (2014). [https://doi.org/10.1007/s11071-013-1149-4..](https://doi.org/10.1007/s11071-013-1149-4)
2. Dunaev A., Shlyuchkov V., Hypergeometric Functions, 2017.

О.А. ФУГА, Д.Р. НИФОНТОВ, Н.А. КУДРЯШОВ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ, ПЕРВЫЕ ИНТЕГРАЛЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБОБЩЁННОГО УРАВНЕНИЯ САСА-САТСУМЫ

Рассмотрено обобщённое уравнение Саса-Сатсумы. Исследуемое уравнение является обобщением нелинейного уравнения Шрёдингера. Обобщённое уравнение Саса-Сатсумы учитывает сложные нелинейные эффекты при описании процесса распространения импульса в нелинейно-оптических средах. Построены законы сохранения и получены соответствующие первые интегралы для изучаемого уравнения. Найдены некоторые точные решения обобщённого уравнения Саса-Сатсумы.

O.A. FUGA, D.R. NIFONTOV, N.A. KUDRYASHOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CONSERVATION LAWS, FIRST INTEGRALS AND EXACT SOLUTIONS FOR THE GENERALIZED SASA-SATSUMA EQUATION

The generalized Sasa-Satsuma equation is considered. The studied equation is a generalization of the nonlinear Schrödinger equation. The generalized Sasa-Satsuma equation takes into account complex nonlinear effects when describing the process of pulse propagation in nonlinear optical media. Conservation laws are constructed and the corresponding first integrals are obtained for the studied equation. Some exact solutions of the generalized Sasa-Satsuma equation are found.

Рассматривается обобщённое уравнение Саса-Сатсумы[1,2] с произвольным значением коэффициента отражения

$$iq_t + aq_{xx} + bq|q|^{2n} + i(\alpha q_{xxx} + \beta q_x|q|^{2n} + \delta q(|q|^{2n})_x) = 0$$

Решение этого уравнения не находится с помощью метода обратной задачи рассеяния, но оно имеет законы сохранения – важнейшие характеристики нелинейных эволюционных уравнений.

Три закона сохранения выражаются функциями.

$$1) \frac{\partial T_1}{\partial t} + \frac{\partial X_1}{\partial x} = 0, \text{ где } T_1 \text{ и } X_1 \text{ равны:}$$

$$T_1 = i|q|^2$$

$$X_1 = a(q^*q_x + q_x^*q) + i\alpha(q_{xx}q^* + q_{xx}^*q - |q_x|^2) + \frac{i}{n+1}(\beta + 2\delta n)|q|^{2n+2} \quad (1)$$

$$2) \frac{\partial T_2}{\partial t} + \frac{\partial X_2}{\partial x} = 0, \text{ где } \delta = 0, \text{ а } T_2 \text{ и } X_2 \text{ равны:}$$

$$T_2 = \frac{i}{2}(q_x^*q - q^*q_x)$$

$$X_2 = \frac{i}{2}(q^*q_t - q_t^*q) + a|q_x|^2 + \frac{b}{n+1}|q|^{2n+2} + i\alpha(q_{xx}q_x^* - q_{xx}^*q_x) \quad (2)$$

$$3) \frac{\partial T_3}{\partial t} + \frac{\partial X_3}{\partial x} = 0, \text{ где } \delta = 0, \text{ а } T_3 \text{ и } X_3 \text{ равны:}$$

$$T_3 = -a|q_x|^2 + \frac{b}{n+1}|q|^{2n+2} + \frac{i\alpha}{2}(q_{xx}^*q_x - q_{xx}q_x^*) + \frac{i\beta}{2(n+1)^2}((q^*)^{n+1}(q^{n+1})_x - ((q^*)^{n+1})_xq^{n+1})$$

$$X_3 = a(q_xq_t^* + q_x^*q_t) + i\alpha(q_{xx}q_t^* - q_{xx}^*q_t) + \frac{i\alpha}{2}(q_{xt}q_x^* - q_{xt}^*q_x) + \frac{i\beta}{2(n+1)^2}(((q^*)^{n+1})_tq^{n+1} - (q^{n+1})_t(q^*)^{n+1}) \quad (3)$$

Используя (1), (2), (3), вычисляются первые интегралы, которые могут быть использованы для дальнейшего анализа уравнения и поиска точных решений.

Также было найдено точное решение при $n = 0$:

$$q = \int \frac{iCq + e^{iCz}}{\sqrt{-\frac{a-2\alpha+b}{\alpha}\left(\frac{q}{e^{iCz}}\right)^2 - \frac{l_1}{\alpha}}} dz, \text{ где } q = q(z), z = x - C_0t \quad (4)$$

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. Kivshar Y. S., Agrawal G. P., Optical Solitons. From Fibers to Photonic Crystals, Academic Press, 2003.
2. Sasa, N., Satsuma, J.: New-type of soliton solutions for a higher-order nonlinear Schrödinger equation. *J. Phys. Soc. Jpn.* 60, 409–417 (1991).
3. Kudryashov, Nikolay A., Conservation laws and Hamiltonian of the nonlinear Schrodinger equation of the fourth order with arbitrary refractive index, 2023, Optik, 286, 10.1016/j.ijleo.2023.170993.

В.С. ДРЮМА
Институт Математики и Информатики, ГУ Р. Молдова, Кишинев

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕГРИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

Для построения решений системы уравнений Навье-Стокса используются геометрические свойства ассоциированного 14-мерного пространства Римана с тензором кривизны Риччи, равным нулю на решениях уравнений.

V.S. DRYUMA
Institute of Mathematics and Informatics, USM, Kishnev, Moldova

GEOMETRIC APPROACH TO INTEGRATION OF THE SYSTEM OF NAVIER-STOKES EQUATIONS

Geometric characteristics of the Riemann space, equipped with the 14-dimensional Ricci-flat metric on solutions of the Navier-Stokes equations to study of their properties are applied.

В докладе рассматриваются примеры решений системы уравнений Навье-Стокса, описывающих свойства течений несжимаемой вязкой жидкости, получаемые на основе применения геометрических характеристик ассоциированного с системой 14-мерного пространства Римана с координатами точек $(x, y, z, t, \eta, \rho, m, u, v, w, p, \xi, \zeta, n)$ и оснащенного Риччи-плоской метрикой $R_{ik} = 0$:

$$\begin{aligned} ds^2 = & 2dxdy + 2dydz + 2dtdz + 2d\eta d\xi + 2d\rho d\zeta + \\ & 2dzdw + 2dmdn + (-u(U^2 + P) - vUV - pU - wUW + \\ & + \mu(wU_z + vU_y + uU_x))d\eta^2 + (-v(V^2 + P) - uUV - \\ & - pV - wVW + \mu(wV_z + vV_y + uV_x))d\rho^2 + (-w(W^2 + P) \\ & - vWV - pW - uUW + \mu(wW_z + vW_y + uU_x))dm^2 - \\ & (uU + vV + wW)dt^2, \end{aligned}$$

на решениях системы, где U, V, W, P, μ – компоненты скорости течения, давления и вязкости.

В качестве дополнительных условий связанных с построением примеров решений уравнений применяется метрика Римана 7-мерного пространства с координатами $\vec{x} = (x, y, z, t, u, v, w)$:

$ds^2 = -2B(\vec{x}, t)dtdv + 2E(\vec{x}, t)dtdw + 2H(\vec{x}, t)dwdv - 2(\int \left(\frac{\partial}{\partial y} H(\vec{x}, t)dx \right) dw^2 + dt dx + dv dy + dz dw$, с компонентами метрического тензора, удовлетворяющими соотношениями вида $\frac{\partial}{\partial y} H(\vec{x}, t) - \frac{\partial}{\partial x} E(\vec{x}, t) = 0$, $\frac{\partial}{\partial z} H(\vec{x}, t) - \frac{\partial}{\partial x} B(\vec{x}, t) = 0$, $\frac{\partial}{\partial z} E(\vec{x}, t) - \frac{\partial}{\partial y} B(\vec{x}, t) = 0$, $H(\vec{x}, t) = \frac{\partial}{\partial x} P(\vec{x}, t)$, $E(\vec{x}, t) = \frac{\partial}{\partial y} P(\vec{x}, t)$, $B(\vec{x}, t) = \frac{\partial}{\partial z} P(\vec{x}, t)$ и, которые описывают геометрические свойства условий совместности уравнений системы Навье-Стокса.

Список литературы

1. V. Dryuma. The Ricci-flat space related with the Navier-Stokes equations. *Buletinul Academiei de Stiintse a Republicii Moldova, Mathematica*, no.2(69), 2012, p.99-102.

В. В. ЦЕГЕЛЬНИК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

О РЕШЕНИЯХ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

Проведен Пенлеве-анализ решений системы дифференциальных уравнений четвертого порядка.

V. V. TSEGEL'NIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

ON SOLUTIONS TO A SYSTEM OF FOURTH-ORDER DIFFERENTIAL EQUATIONS

Painlevé analysis of solutions of a system of fourth-order differential equations is carried out.

Проведен Пенлеве-анализ решений системы дифференциальных уравнений

$$q' = -sq + (\sqrt{2N} - 2u)p, \quad (1)$$

$$w' = -p^2, \quad (2)$$

$$p' = sp - (\sqrt{2N} + 2w)q, \quad (3)$$

$$u' = -q^2 \quad (4)$$

с неизвестными функциями q, w, p, u независимой переменной s и произвольным параметром N .

Система (1) – (4) соответствует модели случайно-матричного типа с ядром Эрмита [1]. Используя формальный тест Пенлеве [2-4] доказана

Теорема 1. Система уравнений (1) – (4) проходит формальный тест Пенлеве и справедливы следующие разложения

$$q = \frac{a_{-1}}{\tau} + a_1\tau + a_2\tau^2 + \dots, \quad \tau = s - s_0, \quad (5)$$

$$w = \frac{1}{4a_{-1}\tau} + b_0 + b_1\tau + b_2\tau^2 + \dots, \quad (6)$$

$$p = \frac{1}{2a_{-1}\tau} + c_1\tau + c_2\tau^2 + \dots, \quad (7)$$

$$u = \frac{a_{-1}^2}{\tau} + u_0 + u_1\tau + u_2\tau^2 + \dots \quad (8)$$

с произвольными постоянными $s_0, a_{-1} \neq 0, c_1, c_2$.

С учетом [4-5] также справедлива

Теорема 2. Разложения (5) – (8) являются сходящимися в окрестности $0 < |s - s_0| < \rho, \rho > 0$.

Замечание. 1. Система (1) – (4) имеет первый интеграл [1] $\sqrt{2N}(u - w) + 2uw = pq + C$, где C – произвольная постоянная.

2. Она является системой Гамильтона с гамильтонианом $H = -spq + (\sqrt{2N} - 2u)\frac{p^2}{2} + (\sqrt{2N} + 2w)\frac{q^2}{2}$.

Список литературы

1. Tracy C. A., Widom H. // Commun. Math. Phys. 1994. Vol. 163. P. 33-72.
2. Ablowitz M.J., Ramani A., Segur H. // J. Math. Phys. 1980. Vol. 21. P. 715-721.
3. Кудряшов Н. А. Аналитическая теория нелинейных дифференциальных уравнений. Институт компьютерных исследований. Москва-Ижевск. 2004.
4. Грицук Е. В., Громак В. И. // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-мат. науку. 2010, №3. С. 25-30.
5. Gromak V. I., Laine I., Shimomura S. Painlevé' differential equations in the complex plane. Walter de Gruyter. Berlin. 2002.

Е.А. ЖУКОВА, Н.А. КУДРЯШОВ, А.А. КУТУКОВ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ИЕРАРХИИ БЮРГЕРСА, ВЫРАЖЕННЫЕ ЧЕРЕЗ ОБОБЩЕННЫЕ ГИПЕРГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

В докладе найдены аналитические решения для обыкновенных дифференциальных уравнений, соответствующих уравнениям иерархии Бюргерса, выраженные через обобщенную гипергеометрическую функцию. Рассмотрены примеры начальных условий, при которых решения выражаются через обобщенные полиномы Эрмита. При выполнении работы использованы методы прямых преобразований и метод математической индукции.

E.A. ZHUKOVA, N.A. KUDRYASHOV, A.A. KUTUKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SOLUTIONS OF THE BURGERS HIERARCHY EQUATIONS EXPRESSED THROUGH GENERALIZED HYPERGEOMETRIC FUNCTIONS

In this report, analytic solutions for ordinary differential equations corresponding to the equations of the Burgers hierarchy, expressed through a generalized hypergeometric function, have been found. Examples of initial conditions for which solutions are expressed through generalized Hermite polynomials are considered. The paper uses methods of direct transformations and the method of mathematical induction.

Известно [1,2], что уравнения иерархии Бюргерса в автомодельных переменных выражаются через обыкновенные дифференциальные уравнения

$$y_{k+1,z} + 2zy_z + 2ny = 0, \quad (1)$$

где $y_{k+1,z} = \frac{d^{k+1}y}{dz^{k+1}}$, $k = 1, 2, \dots$. Решения ОДУ (1) могут быть получены в виде полиномов, представленных в [2]. При построении решений уравнения (1) могут применяться как классические, так и обобщённые полиномы Эрмита [1], корни которых на комплексной плоскости описывают равновесные конфигурации точечных вихрей в фоновом потоке [3].

В докладе доказано, что гипергеометрическое уравнение

$$\frac{d}{dz} \prod_{j=1}^k \left(z \frac{d}{dz} + b_j - 1 \right) y(z) - (z \frac{d}{dz} + a)y(z) = 0 \quad (2)$$

с помощью преобразования переменных сводится к уравнению (1). Доказана линейная независимость найденных решений.

Таким образом, общее решение уравнения (1) может быть найдено в виде

$$y(z) = \sum_{i=0}^k C_i z^i F \left(\frac{i}{m+1} - \frac{n}{m+1}, b_1, \dots, b_k, \frac{2z^{k+1}}{(k+1)^k} \right),$$

где значения b_1, \dots, b_k зависят от i и k . Графики решений уравнения (1) при различных значениях n представлены на рис. 1.

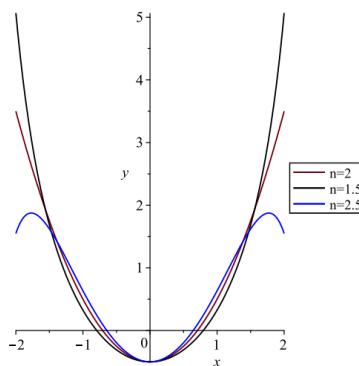


Рис. 1. Графики решений ОДУ, соответствующих уравнениям иерархии Бюргерса, для $k=1; n=1.5, 2, 2.5; y(0)=-0.5, y'(0)=0$.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. Kudryashov N.A. Generalized Hermite polynomials for the Burgers hierarchy and point vortices // Chaos, Solitons & Fractals 2021. Vol. 151. P. 111256.
2. Kudryashov N.A. Special polynomials associated with the Burgers hierarchy // Applied Mathematics and Computation 2012. Vol. 218, №15. P. 7972-7976.
3. Aref H. Vortices and polynomials// Fluid Dynamics Research 2007. Vol. 23.

А.Н. КУЛИКОВ, Д.А. КУЛИКОВ
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

ВОЛНОВОЙ РЕЛЬЕФ В РАМКАХ НЕЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЭРОЗИИ

Рассматривается нелокальное уравнение эрозии, дополненное обобщенными периодическими решениями. Указаны параметры уравнения, при которых рассматриваемая краевая задача имеет волновые решения.

A.N. KULIKOV, D.A. KULIKOV
Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

WAVE RELIEF WITHIN THE FRAMEWORK OF A NONLOCAL EROSION MODEL

A nonlocal erosion equation supplemented by generalized periodic solutions is considered. The parameters of the equation are indicated, at which the boundary value problem under consideration has wave solutions.

Рассматривается математическая модель, которая предназначена для описания формирования пространственно неоднородного (волнового) рельефа на поверхности полупроводников под воздействием потока ионов [1]. Данная модель базируется на изучении дифференциального уравнения с частными производными, содержащими слагаемые с отклоняющимся пространственным аргументом. В одном из самых простых вариантов в нормированном виде в качестве такой модели рассматривается следующая краевая задача (К3) [2,3]

$$S_t = S_{xx} - c\tilde{S}_x - \tilde{S}_x^2, \quad (1)$$

$$S_x(t, x + 2\pi) = S_x(t, x), \quad (2)$$

где $S = S(t, x)$, $\tilde{S} = S(t, x - h)$, $h, c \in R$. Решение КЗ (1),(2) – функция $S(t, x)$ описывает линию раздела между полупроводником и внешней средой.

КЗ (1),(2) имеет решения

$$S_\alpha(t, x) = \beta t + \alpha x + \gamma, \quad \alpha, \gamma \in R, \quad \beta = \beta_\alpha = -c\alpha - \alpha^2. \quad (3)$$

Решения (3) в соответствующем разделе физики, как правило, называют террасами (“плоскими террасами”).

Вместе с тем КЗ (1),(2) имеет решения, которые можно назвать “волновыми террасами”

$$S(t, x) = S_\alpha(t, x) + w(y) + \delta, \quad (4)$$

где $y = x + \omega t$. Волновую функцию $w(y)$ можно найти, если рассмотреть для нее следующую КЗ

$$w_{yy} - c_\alpha \tilde{w}_y - \omega w_y = (\tilde{w}_y)^2 + \delta, \quad (5)$$

$$w(y + 2\pi) = w(y), \quad M_0(w) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} w(y) dy = 0, \quad (6)$$

где теперь $c_\alpha = c + 2\alpha$, $\omega, \delta \in R$ и подлежат определению, как и функция $w(y)$.

Анализ КЗ (5),(6) показал, что существует счетное множество постоянных α_j , а также такие интервалы $I_{\alpha,j,-}, I_{\alpha,j,+}$, где $I_{\alpha,j,-} = (\alpha_j - \Delta_j, \alpha_j)$, $I_{\alpha,j,+} = (\alpha_j, \alpha_j + \Delta_j)$, $j = 1, \dots, m$, $0 < \Delta_j \ll 1$, что справедливо утверждение.

Теорема. При каждом $\alpha \in I_{\alpha,j,-}$ или $\alpha \in I_{\alpha,j,+}$ существует такое значение $\omega = \omega(\alpha), \delta = \delta(\alpha)$, при котором КЗ (5),(6) имеет отличное от нуля решение $w(y, \alpha)$.

Это решение находится в достаточно малой окрестности ее нулевого состояния равновесия. При этом натуральное m может быть выбрано сколь угодно большим.

Иными словами КЗ (1),(2) имеет “счетное множество” двумерных интегральных многообразий, заполненных решениями вида (4), которые в физике пограничных явлений интерпретируются как “волновые террасы”.

Отметим, что рассматриваемую модель можно считать развитием известной модели Бредли-Харпера [4], которая базируется на модифицированном уравнении Курамото-Сивашинского (см., например, [5-6]).

Список литературы

1. Рудый А.С., Бачурин В.И. // Известия РАН, серия физическая. 2008. Т. 72, № 5. С. 624–629.
2. Куликов А.Н., Куликов Д.А. // Матем. мод. 2016. Т. 28, № 3. С. 33–50.
3. Kulikov D.A. // Journal of Math. Sci. 2015. Vol. 205, № 6. P. 791–805.
4. Bradley R.M., Harper J.M.E. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. Vol. 6. P. 2390–2395.
5. Кудряшов Н.А., Рябов П.Н., Стриханов М.Н. // Ядерная физика и инженеринг. 2010. Т. 1, № 2. С. 151–158.
6. Кудряшов Н.А., Рябов П.Н., Федянин Т.Е. // Матем. мод. 2012. Т. 24, № 12. С. 23–28.

А.В. ТЕТЕРЕВ, И.М. КОЗЛОВ, Л.В. РУДАК, Н.И. МИСЮЧЕНКО

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕГКОГАЗОВОЙ МЕТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Разработана модель расчета внутрибаллистических процессов в легкогазовой метательной установке, состоящей из камеры высокого давления в качестве которой может выступать эрозионный плазменный ускоритель, пороховой заряд или камера со сжатым газом и легкогазовой пушки. Математическая модель описывает возникающие в установке течения либо в одномерном, либо в двумерном осесимметричном приближении. Термодинамические свойства используемых веществ и смесей рассматриваются в равновесном приближении.

A.V. TETEREV, I.M. KOZLOV, L.V. RUDAK, N.I. MISUCHENKO
Belarusian State University, Minsk, Belarus

COMPUTER MODEL OF INTRA-BALLISTIC PROCESSES IN A LIGHT GAS LAUNCHER

A model has been developed for calculating intra-ballistic processes in a light-gas launcher consisting of a high-pressure chamber, which can be an erosion plasma accelerator, a powder charge or a chamber with compressed gas, and a light-gas gun. The mathematical model describes the flows occurring in the installation in either one-dimensional or two-dimensional axisymmetric approximations. The thermodynamic properties of the substances and mixtures used are considered in the equilibrium approximation.

Наиболее сложное с физической точки зрения течение среды в рассматриваемой задаче происходит в камере высокого давления, где в начальный момент происходит взрыв алюминиевого проводника, а затем разряд продолжается из-за возникшего в этой области плазменного образования. Для описания динамики течения и нагрева проводника можно использовать систему уравнений магнитной газодинамики, а в легкогазовой секции и в канале разгона можно воспользоваться системой вида [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t} [Q(x)\mathbf{a}] + \frac{\partial}{\partial x} [Q(x)\mathbf{b}] = \mathbf{f} Q'(x),$$
$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho v \\ \rho \left(\varepsilon + \frac{v^2}{2} \right) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \rho v \\ p + \rho v^2 \\ \rho \left(\varepsilon + \frac{v^2}{2} \right) v + \rho v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ p \\ 0 \end{bmatrix},$$

такую систему принято называть каналовым приближением, поскольку она описывает одномерное течение газа в трубе с переменным сечением, площадь которого равна $Q(x)$. Несмотря на свою простоту это очень удобная и довольно точная модель, на которой можно проводить апробацию вычислительных алгоритмов по описанию дополнительных процессов, сопровождающих течение в подобных каналах. В двумерном осесимметричном приближении уравнения газовой динамики записываются в эйлеровой цилиндрической системе координат с перемещающимися границами расчетных ячеек [1].

На рис. 1 схематично изображена установка [2], являющаяся прообразом разрабатываемой нами модели. Здесь желтым цветом изображен фторопластовый изолятор, голубым цветом – инициирующая алюминиевая проволочка, зеленым цветом – начальное положение поршня, а светло-зеленым его конечное положение, красным цветом показано местоположение диафрагмы, а начальное положение метаемого ударника окрашено оранжевым цветом.

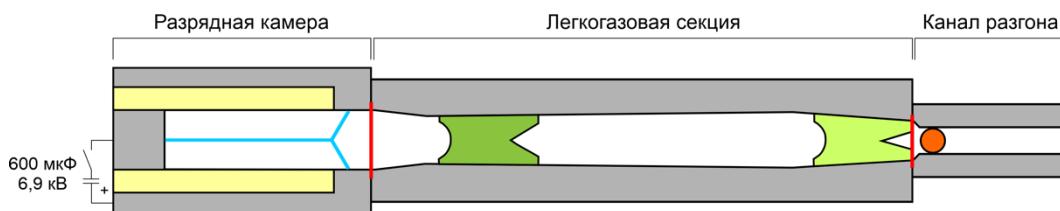


Рис. 1. Пример легкогазовой установки с эрозионным плазменным ускорителем

Тестирование двумерной газодинамической схемы с перемещающимися границами проведено на задаче о горении пороха в цилиндрическом канале. В настоящий момент идет окончательное построение специализированного программного комплекса по моделированию динамики всех основных физико-химических процессов при выстреле подобной установки с целью оптимизации ее геометрических и физических параметров.

Список литературы

1. Годунов С.К., Забродин А.В. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
2. Васецкий В.А., Грищенко В.М., Лещевич В.В., Пенязьков О.Г. // VII ММК-2023: / Минск, 2023. С. 52-58.

Н.В. КУЗНЕЦОВ, Т.Н. МОКАЕВ, М.М. АНИКУШИН, А.О. РОМАНОВ
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

ЛОКАЛИЗАЦИЯ СКРЫТЫХ КОЛЕБАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

В докладе будут рассмотрены недавние результаты, касающиеся обнаружения скрытых аттракторов в модели Рабиновича маломерной турбулентности, модели запаздывающего осциллятора Суареса-Шопфа южной осцилляции Эль-Ниньо, модели Ву-Кся кольцевого массива линий передач без потерь и p -адической модели Уилсона-Коуэна распространения активностей в синаптически связанный нейронной сети.

N.V. KUZNETSOV, T.N. MOKAEV, M.M. ANIKUSHIN, A.O. ROMANOV
St Petersburg University, St Petersburg, Russia

LOCALIZATION OF HIDDEN OSCILLATIONS IN DYNAMICAL MODELS OF PHYSICAL PHENOMENA

In this lecture we will discuss recent results concerning localization of hidden attractors in the Rabinovich model for low-dimensional turbulence, in the delayed oscillator model of Suarez-Schopf for El-Nino Southern Oscillation, in the model of a ring array of coupled lossless transmission lines due to Wu-Xia and in the p -adic Wilson-Cowan model for activity in a synaptically coupled neuronal network.

Развитие теории устойчивости, теории бифуркаций и теории хаоса, а также новые вычислительные технологии позволили по-новому взглянуть на ряд известных научных проблем и практических задач анализа многомерных динамических моделей теоретических и прикладных систем, что привело к появлению *теории скрытых колебаний* [1,2], ставшей современным этапом развития теории колебаний А.А. Андронова. Основой теории скрытых колебаний стала новая классификация колебаний как самовозбуждающихся или скрытых. В то время как самовозбуждение колебаний может быть эффективно исследовано численно, выявление скрытых колебаний требует применения специальных аналитико-численных методов [2,3]. Состояние системы, обладающей скрытыми колебаниями, под воздействием импульсов может перейти в нежелательный колебательный режим, а постоянное воздействие шума может вызвать хаотическое поведение в изначально не хаотической системе в результате совместного влияния нескольких аттракторов, находящихся близко к бассейнам притяжения друг друга.

Возникновение скрытых колебаний связано с нелокальными бифуркациями системы (простейший пример доставляет седлоузловая бифуркация периодических орбит). Нередко подобные бифуркации происходят на границе глобальной устойчивости в пространстве параметров, при которых теряется сходимость траекторий к стационарному множеству [4]. Поэтому оценка или определение границы глобальной устойчивости является одним из основных элементов исследования возможности возникновения скрытых аттракторов в системе. Здесь помимо классического прямого метода Ляпунова имеется эффективный способ получения оценок границы глобальной устойчивости на основе обобщенного критерия Бендинсона для аттракторов и оценок размерности [5,6]. В случае сильно многомерных или бесконечномерных задач иногда удается упростить и/или обосновать методы локализации с помощью инерциальных многообразий [7, 8].

В данном докладе мы рассмотрим вопросы исследования физических систем со скрытыми колебаниями и аттракторами на примере моделей с запаздыванием Суареса-Шопфа и Ву-Кся [8], p -адической модели Уилсона-Коуэна и модели Рабиновича [9].

Список литературы

1. Kuznetsov N.V., Lobachev M.Y., Yuldashev M.V., Yuldashev R.V., Kudryashova E.V., Kuznetsova O.A., Rosenwasser E.N., Abramovich S.M. // The birth of the global stability theory and the theory of hidden oscillations, 2020 European Control Conference (ECC), 2020, 769-774.
2. Кузнецов Н.В. // Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления, Известия РАН. Теория и системы управления, №5, 2020.
3. Wang X., Kuznetsov N.V., Chen G. // *Chaotic Systems with Multistability and Hidden Attractors*. 2021. Springer
4. Kuznetsov, N.V., Lobachev, M.Y., Mokaev, T.N. // Hidden boundary of global stability in a counterexample to the Kapranov conjecture on the pull-in range. Doklady Mathematics. Vol. 108. No. 1. Moscow: Pleiades Publishing, 2023.
5. Kuznetsov N.V., Reitmann V. // *Attractor Dimension Estimates for Dynamical Systems: Theory and Computation*. 2021. Springer International Publishing AG
6. Anikushin M.M., Romanov A.O. // On the recent progress in effective dimension estimates for delay equations. *Diferencialnie Uravneniya i Protsesy Upravleniya*. 2024. No. 1, 22–46
7. Anikushin M.M., Romanov A.O. // Hidden and unstable periodic orbits as a result of homoclinic bifurcations in the Suarez–Schopf delayed oscillator and the irregularity of ENSO. *Physica D*. 2023. Vol. 445, 133653
8. Anikushin M.M. // Frequency theorem and inertial manifolds for neutral delay equations. 2023. *Journal of Evolution Equations*. Vol. 23, No. 4, 66
9. Kuznetsov N.V., Leonov G.A., Mokaev T.N., Prasad A., Shrimali M.D. // Finite-time Lyapunov dimension and hidden attractor of the Rabinovich system. *Nonlinear Dynamics*. 2018. Vol. 92, No. 2, 267–285

Ю.Н. ГРИГОРЬЕВ, Е.И. КАПЦОВ, С.В. МЕЛЕШКО

Институт вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

Школа математики и Геоинформатики, Технологический университет им. Суранари, Накхонратчасима, Таиланд

ГРУППОВОЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ БИНАРНОЙ СМЕСИ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ

В докладе рассматривается система уравнений, описывающая одномерное нестационарное движение двухкомпонентного химически реагирующего газа. Проведена полная групповая классификация, позволяющая, в частности, выявить автомодельные решения задачи о сильном точечном взрыве. Вместо решения сложной системы определяющих уравнений алгебры Ли инвариантных преобразований используется альтернативный метод, основанный на преобразованиях эквивалентности. Такой подход позволяет рассмотреть реальные процессы химической кинетики аррениусового типа. В качестве примера рассматривается задача о сильном взрыве, которая, как и в классическом случае, сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений в автомодельных переменных, которые отличаются от случая идеальной газовой динамики. Приведены результаты численного интегрирования системы.

Данная работа была финансово поддержана Российским научным фондом (проект № 23-11-00027). Е.И.К. выражает благодарность Технологическому Университету им. Суранари, Таиланд, и Таиландскому научно-исследовательскому и инновационному фонду (TSRI).

Y.N. GRIGORIEV, E.I. KAPTSOV, S.V. MELESHKO

Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, Russia

School of Mathematics\&Geoinformatics, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

GROUP ANALYSIS OF THE SYSTEM OF DYNAMIC EQUATIONS OF A BINARY MIXTURE OF CHEMICALLY REACTIVE GASES

This report examines a system of equations describing the one-dimensional unsteady motion of a two-component chemically reacting gas. A complete group classification is performed, allowing, in particular, the identification of self-similar solutions to the problem of a strong point explosion. Instead of solving the complex system of determining equations for the Lie algebra of invariant transformations, an alternative method based on equivalence transformations is applied. This approach enables the study of realistic chemical kinetics of the Arrhenius type. As an example, the problem of a strong explosion is considered. As in the classical case, it reduces to solving a system of ordinary differential equations in self-similar variables, which differ from those in ideal gas dynamics. The results of the numerical integration of the system are presented.

This work was supported financially by the Russian Science Foundation (project code 23-11-00027). E.I.K. acknowledges Suranaree University of Technology (SUT), Thailand and Thailand Science Research and Innovation (TSRI) for Full-time Doctoral Researcher Fellowship.

А.И. ЗЕМЛЯНУХИН, Н.А. АРТАМОНОВ, В.А. БОЧКАРЕВ
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗНАКА КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА НА ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛН ДЕФОРМАЦИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ

Показано, что в цилиндрических оболочках из ауксетических материалов возможно аномальное дисперсионное поведение линейных волн, когда продольные волны распространяются медленнее сдвиговых.

A.I. ZEMLYANUKHIN, N.A. ARTAMONOV, V.A. BOCHKAREV
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE POISSON'S RATIO SIGN ON THE DISPERSION PROPERTIES OF DEFORMATION WAVES IN CYLINDRICAL SHELLS

It is shown that in cylindrical shells made of auxetic materials, anomalous dispersion behavior of linear waves is possible, when longitudinal waves propagate slower than shear waves.

В последние десятилетия существенное внимание исследователей привлекают проблемы волновой динамики новых конструкционных материалов, в том числе композитных и ауксетических. Важность подобных исследований объясняется возможностью разработки методов акустического неразрушающего контроля новых материалов [1]. В стержнях, изготовленных из классических и ауксетических материалов выявлены принципиальные отличия в свойствах распространяющихся волн. Установлено что скорость продольной волны в ауксетическом стержне может быть меньше скорости сдвиговой волны, а групповая скорость в широком частотном диапазоне превосходит фазовую [1].

При анализе осесимметричного волнового процесса в тонкой цилиндрической оболочке установлено, что продольная волна распространяется со стержневой скоростью [2]. Получено безразмерное значение скорости $C^2 = 1 - \mu^2$, где μ – коэффициент Пуассона. Для пучка сдвиговых волн, распространяющихся вдоль образующей цилиндрической оболочки, получено безразмерное выражение скорости $C^2 = (1 - \mu)/2$, зависящее от знака коэффициента Пуассона [3]. Как известно, акустические свойства материалов определяются отношением квадратов скоростей распространения продольных и поперечных волн, которое в данном случае равно $.2(1 + \mu)$. Отметим, что данное выражение совпадает с полученным ранее для стержня [1]. Видно, что при положительных μ скорость продольных волн больше скорости сдвиговых волн. При отрицательных значениях коэффициента Пуассона, больших $\frac{1}{2}$, дисперсия продольных волн остается нормальной, но скорости волн выравниваются. При $\mu = \frac{1}{2}$ скорости продольных и сдвиговых волн совпадают. Для значений коэффициента Пуассона из интервала $(-1; 0,5)$ скорость сдвиговых волн превышает скорость продольных волн.

В случае осесимметричных изгибо – продольных волн выявлено критическое значение волнового числа, ниже которого дисперсия является нормальной, а выше – аномальной, независимо от знака коэффициента Пуассона. При распространении продольно – изгибных волн нормальная дисперсия имеет место при положительных μ , в то время как при отрицательных значениях коэффициента Пуассона групповая скорость превосходит фазовую. Другими словами, в цилиндрических оболочках из ауксетических материалов возможно аномальное дисперсионное поведение линейных волн.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00071

Список литературы

1. Ерофеев В.И., Кажаев В.В., Семерикова Н.П. Нелинейные продольные волны в стержне, материал которого обладает отрицательным коэффициентом Пуассона, Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79. №4. С.398-412.
2. Zemlyanukhin A. I., Bochkarev A. V., Artamonov N. A., Physically Admissible and Inadmissible Exact Localized Solutions in Problems of Nonlinear Wave Dynamics of Cylindrical Shells, Rus. J. Nonlin. Dyn., 2024, Vol. 20, no. 2, pp. 219-229. DOI:10.20537/nd240602
3. Zemlyanukhin A. I., Bochkarev A. V., Artamonov N. A. Shear waves in a nonlinear elastic cylindrical shell. Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics, 2024, vol. 24, iss. 4, pp. 578–586. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2024-24-4-578-586>, EDN: WBBTTQ

О.В. БЛИНКОВА¹, Д.В. КОНДРАТОВ²

¹Саратовская государственная юридическая академия, г. Саратов, Россия

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия; Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН), г. Саратов, Россия; Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАЙМОДЕЙСТВИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ВИБРООПОРЫ С ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Исследована математическая модель механической системы, состоящей из абсолютно жесткой пластины (вибратора) и трехслойной упругой пластины (статора) и слоя вязкой сжимаемой жидкости, находящейся между пластины. Определены и численно исследованы амплитудные частотные характеристики упругой трехслойной пластины.

O.V. BLINKOVA¹, D.V. KONDRATOV²

¹Saratov State Academy of Law, Saratov, Russia

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia; Institute of Precision Mechanics and Control Problems of the Russian Academy of Sciences (IPMCP RAS), Saratov, Russia; Saratov State University, Saratov, Russia

STUDY OF INTERACTION OF A THREE-LAYER COMPOSITE VIBRATION SUPPORT WITH A VISCOUS COMPRESSIBLE FLUID

The mathematical model of the mechanical system consisting of an absolutely rigid plate (vibrator) and a three-layer elastic plate (stator) and a layer of viscous compressible liquid located between the plates is investigated. The amplitude frequency characteristics of the elastic three-layer plate are determined and numerically investigated.

Многослойные упругие пластины, взаимодействующие с жидкостью, получили свое широкое применение в машино- и агрегатостроении [1,2,3]. Такие конструкции широко представлено в современной литературе, но многие исследования направлены на описание взаимодействия упругих многослойных конструкций с вязкой несжимаемой или с идеальной жидкостью [1].

Рассмотрим физическую модель системы, представленной на рис.1. Рассмотрим физическую модель механической системы, состоящую из абсолютно жесткой пластины I (вибратора), имеющий упругий подвес, и трехслойной упругой пластины II (статора), пространство III заполнено вязкой сжимаемой жидкостью (рис.1). Внутренняя поверхность вибратора считается плоской и является одной из стенок щелевого канала. Пульсация давления в слое жидкости создает гармонические колебания вибратора в вертикальном направлении относительно статора[2].

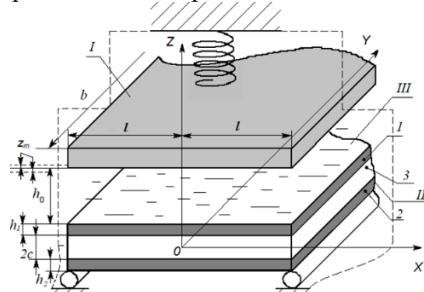


Рис. 1 Физическая модель

Математическая модель представим в виде связанной системы уравнений динамики движения вязкой сжимаемой жидкости, динамики упругого статора, состоящего из двух несущих слоев и заполнителя, с соответствующими граничными условиями [2]. В результате исследования математической модели были найдены амплитудные частотные характеристики колебаний упругого трехслойного композита и давления в слое вязкой жидкости. Исследования показали, что изменением размеров слоев, используемых материалов пластины и ширины слоя вязкой жидкости можно сместить резонансные частоты из области опасных частот.

Список литературы

1. Bykova, T.V., Grushenkova, E.D., Popov, V.S., Popova, A.A. Hydroelastic response of a sandwich plate possessing a compressible core and interacting with a Rigid Die Via a viscous fluid layer // Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2020, 20(3), pp. 351-366. DOI: 10.18500/1816-9791-2020-20-3-351-366
2. О. В. Блинкова, Д. В. Кондратов. Моделирование динамики взаимодействия сдавливаемого слоя вязкой сжимаемой жидкости с упругим трехслойным статором // Труды МАИ. – 2024. – № 134. – EDN HUZOPQ.
3. Hameury, Celia & Ferrari, Giovanni & Franchini, Giulio & Amabili, Marco. (2024). An experimental approach to multi-input multi-output nonlinear active vibration control of a clamped sandwich beam. Mechanical Systems and Signal Processing. 216. 111496. 10.1016/j.ymssp.2024.111496.

В.С. ПОПОВ^{1,2}, А.А. ПОПОВА¹, А.В. ЧЕРНЕНКО¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

²Институт проблем точной механики и управления - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия

ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТЕНКИ НА НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОМ ПОДВЕСЕ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ВИБРИРУЮЩИМ ШТАМПОМ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Рассмотрены продольные колебания жесткой пластины на упругом подвесе с кубической нелинейностью, образующей стенку узкого канала с вязкой жидкостью, возбуждаемые вибрацией противоположной стенки. Сформулирована краевая задача, асимптотический анализ позволил свести ее к рассмотрению обобщенного уравнения Дуффинга. Используя метод гармонического баланса построены гидроупругий и фазовый отклики стенки в виде неявных функций и проведено их численное исследование.

V.S. POPOV^{1,2}, A.A. POPOVA¹, A.V. CHERNENKO¹

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

²The Institute for Precision Mechanics and Control Problems is a separate structural subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Federal Research Center "Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Saratov, Russia

LONGITUDINAL OSCILLATIONS OF A WALL ON A NONLINEAR-ELASTIC SUSPENSION INTERACTING WITH A VIBRATING DIE VIA A VISCOUS FLUID LAYER

Longitudinal oscillations of a rigid plate on an elastic suspension with cubic nonlinearity and forming the wall of a narrow channel excited by vibration of the opposite wall through a viscous fluid filling the channel were considered. The boundary value problem was formulated, and asymptotic analysis had reduced it to the generalized Duffing equation. The hydroelastic and phase response of the wall in the form of implicit functions were constructed using the harmonic balance method, and a numerical study of these responses was done.

Одно из направлений современной гидроупругости [1] связано с исследованием вынужденных колебаний упругих конструкций, контактирующих со слоем вязкой жидкости. Например, в [2] исследованы установившиеся вынужденные колебания предварительно растянутой пластины из высокоэластичного материала, установленной на слое вязкой жидкости, ограниченным снизу неподвижной жесткой стенкой, под действием сосредоточенной гармонической силы, действующей на поверхности пластины, не контактирующей с жидкостью. Для описания движения пластины и слоя жидкости авторы используют линеаризованные уравнения. Однако, даже при рассмотрении гидроупругих колебаний твердого тела, имеющего нелинейно-упругий подвес, необходима постановка связанный нелинейной краевой задачи [3], а решение таких задач требует привлечения методом нелинейной математической физики [4]. В [5] поставлена и решена задача вынужденных поперечных колебаний жесткой стенки узкого плоского канала, заполненного пульсирующей вязкой жидкостью, имеющей упругоподатливую опору с нелинейной жесткостью. В настоящей работе рассмотрен узкий плоский канал с параллельными жесткими стенками, заполненный вязкой жидкостью. Верхняя стенка – штамп, совершающий продольные вибрации по гармоническому закону. Нижняя стенка закреплена на упругом подвесе с жесткой кубической нелинейностью и может перемещаться в продольном направлении. Давление на торцах канала задано и считается постоянным. Жидкость рассмотрена как ньютоновская и несжимаемая. Краевая задача включает: двумерные уравнения Навье-Стокса, уравнение неразрывности и уравнение стенки как одномассового осциллятора с кубической нелинейностью с возмущающей силой, определяемой касательными напряжениями в жидкости. Границные условия: непроскальзывания на стенах канала и условия равенства давления на торцах заданному постоянному уровню. Введены в рассмотрение два малых параметра задачи: относительная толщина слоя жидкости в канале и относительная амплитуда колебаний стенки канала. Асимптотический анализ позволил получить линеаризованные уравнения динамики тонкого слоя вязкой жидкости. Их решение осуществлено методом итерации и получено выражение для давления жидкости через законы движения стенок канала. В результате получено обобщение уравнения Дуффинга для нелинейных продольных колебаний стенки канала. Решение данного уравнения проведено методом гармонического баланса. В итоге получены выражения для гидроупругого и фазового откликов стенки канала в виде неявных функций, исследование которых проведено численно.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (шифр темы: FMRN-2025-0008).

Список литературы

1. Paidoussis M.P. Fluid-Structure Interactions. Volume 2: Slender Structures and Axial Flow. 2nd Edition. London: Elsevier Academic Press, 2016. 942 p.
2. Akbarov S.D., Imamaliyeva J.N. // J. Sound Vib. 2025. Vol. 107. 598. Art. no. 118862
3. Barulina M., Santo L., Popov V. and others // Mathematics. 2022. Vol. 10, art. no. 3844.
4. Курдяшов Н.А. Методы нелинейной математической физики. Долгопрудный: Изд. дом "Интеллект", 2010. 368 с.
5. Попов В.С., Попова А.А. // Компьютерные исследования и моделирование. 2022. Т. 14. № 1. С. 79-92.

А.В. БОЧКАРЕВ¹, М.Ю. ГОРСКИЙ²

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

²Автономная некоммерческая организация «НИИ ТСК», Москва, Россия

ПРОБЛЕМА ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ ПРИ ОБРАТНОМ РАСЧЕТЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Рассмотрены погрешности, возникающие при определении зависимости модуля упругости асфальтобетона, образующего верхний слой многослойной дорожной одежды, от температуры, при использовании модели однородных слоев.

A.V. BOCHKAREV¹, M.YU. GORSKIY²

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

²Autonomous non-profit organization "NII TSK", Moscow, Russia

THE PROBLEM OF TEMPERATURE CORRECTION IN THE BACKCALCULATION OF MECHANICAL PARAMETERS OF MULTILAYER ROAD PAVEMENTS

The errors of the homogeneous layer model are considered when determining the dependence of the elastic modulus of asphalt concrete, which forms the upper layer of a multilayer road surface, on temperature.

Порядок неразрушающего контроля состояния дорожных одежд с использованием установок динамического нагружения (УДН) регламентируется национальным стандартом РФ от 2021 г. [1]. Согласно стандарту, информация о перемещениях поверхности дорожной одежды в процессе распространении упругой волны, вызванной падением груза УДН, используется при решении обратной задачи теории упругости по определению модулей упругости слоев дорожной одежды. При этом каждый слой считается однородным, изотропным и имеющим постоянную толщину.

Между тем, асфальтобетон, составляющий верхний слой, относится к вязкоупругим материалам, модуль упругости (модуль жесткости) которых существенно зависит как от длительности приложения нагрузки, так и от температуры. В исследовании [2], опирающемся на информацию от станций температурного мониторинга, установленных на действующих автомобильных дорогах, показано, что большую часть времени суток распределение температуры, а, следовательно, и модуля упругости по толщине асфальтобетонного слоя характеризуется значительной неоднородностью. Для оценки степени поврежденности, накопленной слоем асфальтобетона в процессе эксплуатации, необходимо произвести температурную коррекцию, в процессе которой вычисленное в ходе решения обратной задачи значение модуля упругости приводится к нормативной температуре, равной 10°C. Решение указанной задачи требует выяснения температурной зависимости модуля упругости асфальтобетона, который использовался при устройстве рассматриваемой дорожной одежды. В настоящем исследовании конечно-элементная модель дорожной одежды, учитывающая неоднородность слоев, используется для анализа погрешности расчетов в рамках упрощенной модели с однородными слоями, рекомендуемой к применению в [1].

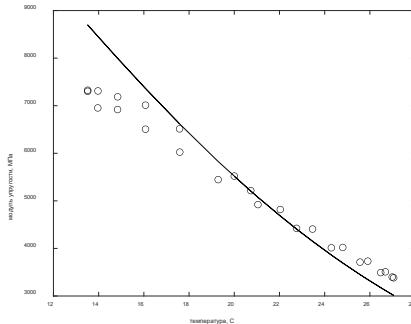


Рис. 1. Теоретическая (сплошная линия) и восстановленная с помощью обратного расчета (кружки) температурные зависимости модуля упругости асфальтобетона

Установлено, что упрощенная модель приводит к значительным погрешностям в ситуациях, когда температура слоя асфальтобетона возрастает с глубиной; средние угловые коэффициенты теоретической и расчетной температурных зависимостей отличаются почти в 1.5 раза. Таким образом, методика температурной коррекции, предложенная в стандарте [1], нуждается в модернизации.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 25-29-00231).

Список литературы

- ГОСТ Р 59918-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Методики оценки прочности. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 50 с
- Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Бочкарев А.В. Моделирование температурных полей в многослойных дорожных одеждах на основе данных мониторинга // Вестник Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", 2024. Т.13. № 3. С.142-153.

С.П. БАУТИН, И.А. ВАЗИЕВА
Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

В докладе рассмотрено применение тригонометрических рядов при решении задачи Коши для нелинейного уравнения теплопроводности. Получены системы обыкновенных дифференциальных уравнений для определения коэффициентов используемого ряда. Приведены примеры построенных приближенных решений и установлены их свойства.

S. P. Bautin, I. A. Vazieva
Snezhinsk Institute of Physics and Technology NRNU MEPhI, Snezhinsk, Russia

REPRESENTATION OF TRIGONOMETRIC SERIES FOR SOLUTIONS THE NONLINEAR HEAT CONDUCTIVITY EQUATION

The report discusses the use of trigonometric series in solving Cauchy problems for the nonlinear equation of heat conduction. Systems of ordinary differential equations for determining the coefficients of the series used are obtained. Examples of constructed approximate solutions are given and their properties are established.

В настоящее время основным способом построения решений у начально-краевых задач для нелинейных уравнений с частными производными являются разностные методы, при которых численно определяется конечное число значений искомых функций в отдельных изолированных точках. Но часто под вопросом остается надежность получаемых разностными методами численных результатов.

Среди аналитических методов получения решений нелинейных уравнений с частными производными одним из основных методов является использование конечных или бесконечных представлений с применением различных систем базисных функций для разных функциональных пространств. Например, методика применения бесконечных тригонометрических рядов была эффективно применена для математического моделирования одно- и двумерных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа при построении решений нелинейной системы уравнений с частными производными смешанного типа [1]. Представление с помощью тригонометрического ряда решения задачи Коши было успешно применено для уравнения Бюргерса [2], являющегося нелинейным уравнением с частными производными. Также и в случае нелинейной системы уравнений движения построены [3] сходящиеся тригонометрические ряды, задающие решения соответствующих задач Коши.

Для нелинейного уравнения теплопроводности на конечном отрезке задаются непрерывные начальные условия, которые чётным образом продолжаются на симметричный относительно начала координат отрезок. Решение получившейся задачи ищется в виде тригонометрических рядов только по косинусам, с коэффициентами, зависящими от времени. Решение рассматриваемого уравнения в виде тригонометрических рядов только по синусам невозможно в силу конкретного вида нелинейности исходного уравнения. Выписана бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений для искомых коэффициентов рядов. Для получения приближенных решений вместо бесконечных рядов рассматриваются конечные суммы и численно решаются конечные системы обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов этих сумм.

Анализ поведения графиков решений показывает, что с течением времени температура решения выравнивается. При этом, во все моменты времени площадь фигуры под соответствующей кривой постоянна, что соответствует изначальному свойству конкретных решений нелинейного уравнения теплопроводности.

Список литературы

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Карелина О.А., Обухов А.Г. Решение нелинейных уравнений с частными производными тригонометрическими рядами. Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2024. 153 с.
2. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление решений уравнения Бюргерса тригонометрическими рядами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, том 11, № 4, с. 305-318.
3. Баутин С.П., Карелина О.А., Обухов А.Г. Представление решений системы уравнений движения с помощью тригонометрических рядов // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2023. Т. 12, № 1. С. 39-51.

С.П. БАУТИН, А.Г. ОБУХОВ
Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ С ЧАСТНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ

Рассмотрено применение тригонометрических рядов при решении задач Коши, поставленных для нелинейных уравнений и нелинейных систем уравнений с частными производными. Выведены системы обыкновенных дифференциальных уравнений для определения коэффициентов используемых рядов. Приведены примеры построенных приближенных решений.

S.P. BAUTIN, A.G. OBUKHOV
Snezhinsk Institute of Physics and Technology NRNU MEPhI, Snezhinsk, Russia
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

APPLICATION OF TRIGONOMETRIC SERIES FOR SOLVING NONLINEAR PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS

The use of trigonometric series in solving Cauchy problems posed for nonlinear equations and nonlinear systems of partial differential equations is considered. Systems of ordinary differential equations for determining the coefficients of the series used are derived. Examples of approximate solutions constructed are given.

В докладе на примере конкретных задач описана методика представления решений нелинейных уравнений и нелинейных систем уравнений с частными производными в виде бесконечных тригонометрических рядов [1]. Вначале рассмотрены одномерные нестационарные задачи Коши для уравнения Бюргерса и для нелинейного уравнения теплопроводности. Далее исследованы одномерные решения полной системы уравнений Навье-Стокса, описывающие течения сжимаемого вязкого теплопроводного газа. Затем приведены двумерные нестационарные задачи Коши для системы уравнений движения и для полной системы уравнений Навье-Стокса. Доказаны теоремы о локальной по времени сходимости рядов и о сходимости рядов во всем одномерном и двумерном пространствах независимых физических переменных. Приближенные решения рассмотренных задач Коши строятся в виде конечных отрезков тригонометрических рядов. Коэффициенты этих конечных сумм численно определяются при решении соответствующих задач Коши для конечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. При различных наборах начальных данных в работе построены соответствующие приближенные нестационарные одно- и двумерные периодические по пространственным переменным решения и проанализированы их свойства.

Список литературы

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Карелина О.А., Обухов А.Г. Решение нелинейных уравнений с частными производными тригонометрическими рядами. Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2024. 153 с.

Д.А. ПЧЕЛКИНА, А.В. КАПУСТИН
Саровский физико-технический институт филиал НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОПОДАТЛИВОГО ОРТЕЗА КОЛЕННОГО СУСТАВА ЧЕЛОВЕКА В СРЕДЕ CAE MBD

В работе представлены результаты структурного синтеза упругоподатливого механизма ортеза коленного сустава человека и последующего его моделирования в среде CAE MBD. Произведена замена твёрдых звеньев на гибкие и замена кинематических пар упругоподатливыми утонениями. Приведена структурная схема механизма с гибким элементом. Выполнен расчет крайних положений деформированного состояния, методом конечных элементов рассчитаны деформации и напряжения упругого звена.

D.A. PCHELKINA, A.V.KAPUSTIN
Sarov Physics and Technology Institute MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia

DIGITAL MODELING OF THE ELASTICALLY PLIABLE ORTHOSIS OF A HUMAN KNEE JOINT IN CAE MBT

This paper presents the results of the structural synthesis of the compliant mechanism of orthosis of the human knee joint and its subsequent modeling in CAE MBD. The work done in this paper includes: the replacement of rigid nodes with an elastic node and the replacement of the kinematic pairs with elastic thinning. The development of the structural scheme of the mechanism with an elastic component. And lastly the calculation of border positions of the deformation state via the method of finite elements, as well as the calculation of the deformation and tension of an elastic node.

Для описания движения экзоскелета при равномерной прямолинейной ходьбе можно воспользоваться несколькими уравнениями. Положение таза (точки D) при изменении углов между звеньями в тазобедренном суставе α и коленном суставе β через длины звеньев можно представить, как:

$$\begin{cases} x_D = l_B \sin \alpha + l_T \sin \beta + x_B \\ y_D = l_B \cos \alpha + l_T \cos \beta + y_B \end{cases}$$

Где l_B и l_T длина бедра и голени.

Центр тяжести и жестко связанная с ним точка подвеса ног перемещаются в вертикальной плоскости по кривой, близкой к гармонической функции с периодом, равным половине длительности цикла шага. Поэтому движение т. D в вертикальной плоскости можно рассматривать как систему уравнений:

$$\begin{cases} x_D = \int v dt \\ y_D = l_B + l_T + \frac{f_D}{2} \left[\cos \left(\frac{2\pi}{0,5T} t + \psi \right) - 1 \right]. \end{cases}$$

Где $T = \frac{2l_u}{v} = \frac{2l_u}{x_D}$ длительность (период) цикла шага; f_D – размах колебаний центра тяжести человека по вертикальной оси; ψ – начальная фаза колебаний [1].

Для предложенного твердотельного механизма ортеза человека спроектирован гибкий, упругий элемент с поступательным приводом. При необходимом масштабировании данный элемент может повторять движения любого из вращательных суставов человека: бедренного, коленного, голеностопного. В ходе компьютерного моделирования в среде CAE RecurDyn, численными методами, была исследована деформация гибкого элемента, определены углы отклонения гибкого звена и получены цветовые диаграммы состояния гибкого элемента под нагрузкой в двух направлениях.

Список литературы

1. Капустин, А. В. Синтез гибкого механизма (compliant mechanism) коленного сустава медицинского экзоскелета / А. В. Капустин // Экстремальная робототехника. – 2024. – № 1(34). – С. 312-317. – EDN OEIHTN.

А.О. КАЗАЧИНСКИЙ, И.Ю. КРУТОВА

Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск,
Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ТИПА ТОРНАДО

На основе схемы, предложенной профессором Баутином С.П., и исходя из данных шкалы Фудзиты, где систематизированы данные натурных наблюдений за этим природным явлением, установлены внешние радиусы притока воздуха в придонных частях торнадо всех классов из таблицы Фудзиты, рассчитаны газодинамические характеристики и кинетическая энергия потока. Рассчитаны мгновенные линии тока для нестационарного случая трехмерного течения политропного газа.

A.O. KAZACHINSKIJ, I.Y. KRUTOVA

Snezhinsky Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University "MEPhI", Snezhinsk, Russia

MATHEMATICAL MODELING OF UNSTATIONARY CURRENTS OF UPSCIDING SWIRLING FLOWS TYPE TORNADO

Based on the scheme proposed by Professor Bautin S.P. and on the data of the Fujita scale, where the data of field observations of this natural phenomenon are systematized, the external radii of the air inflow in the bottom parts of tornadoes of all classes from the Fujita table are established, the gas-dynamic characteristics and kinetic energy of the flow are calculated. Instantaneous streamlines are calculated for the non-stationary case of a three-dimensional flow of polytropic gas.

Данное исследование является актуальным в силу необходимости понимания физических процессов, вызывающих и поддерживающих достаточно длительное время восходящих закрученных движений воздуха. Изучение природы возникновения вихрей (торнадо, смерчи, тропический циклон) необходимо для раннего предупреждения и эффективной борьбы с их разрушительными последствиями.

Для системы уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса по предложенной С. П. Баутином (см. [1–2]) схеме возникновения и устойчивого функционирования восходящих закрученных потоков рассмотрена одна конкретная характеристическая задача Коши с начальными данными на непроницаемой горизонтальной плоскости $z=0$ [3]. Рассмотренная задача является характеристической задачей Коши стандартного вида, у которой в случае аналитичности входных данных имеется единственное аналитическое решение. Описана процедура построения коэффициентов бесконечных рядов с тем, чтобы конечный отрезок этого ряда применить для приближенного описания течений газа в придонных частях торнадо и тропического циклона, что позволило численно находить решения для описания стационарного трехмерного течения газа в восходящих закрученных потоках. Распределения газодинамических параметров исследуемых течений представлены в числовом и в графическом виде. Они соответствуют данным натурных наблюдений за торнадо различных классов и за тропическим циклоном средней интенсивности. Анализ геометрических, скоростных и энергетических характеристик рассматриваемых течений показал следующее: разрушительный характер имеют те, наблюдавшиеся в природе торнадо, у которых кинетическая энергия окружного движения в придонной части больше кинетической энергии радиального движения воздуха в этой части потока.

С помощью численного метода характеристик численно найдены решения для коэффициентов рядов, которые определяются через систему уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса, которая описывает трехмерное нестационарное придонное течение политропного газа в восходящих закрученных потоках. Представлен анализ и исследование коэффициентов сходящихся рядов для газодинамических параметров различных классов по данным натурных наблюдений, которые повторяют природное явление.

Список литературы

1. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. – Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – 399 с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса. – Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 181 с.
3. Казачинский А.О., Крутова И.Ю. Построение течений в придонной части восходящих закрученных потоков как решение одной характеристической задачи Коши : Препринт. – Снежинск : издательство СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – 60 с.

С.Г. КЛИМАНОВ, А.В. КРЯНЕВ, В.А. ТРИКОЗОВА, Д.Д. ЦАРЕВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗНАЧЕНИЯХ ТЕКУЩИХ ПОКАЗАНИЙ ПАЦИЕНТА ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ (ИВЛ) С ПОМОЩЬЮ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПОЛИНОМОВ

Рассматривается проблема выявления аномальных выбросов и нивелирования их отрицательного влияния на выделяемые значимые характеристики рассчитываемых показателей, необходимых для принятия оптимальных значений параметров вентиляционного потока, обеспечивающих наиболее эффективное лечение пациента. Для решения поставленной задачи в статье рассматриваются и применяются робастный метод, основанный на применении ортогональных полиномов.

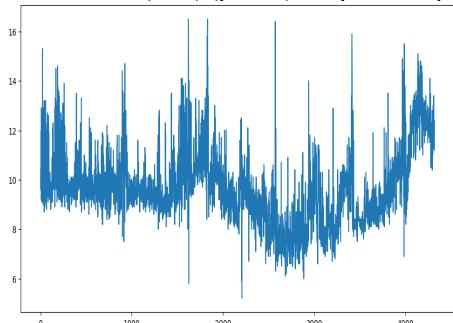
S.G. KLIMANOV, A.V. KRYANEV, V.A. TRIKOZOVA, D.D. TSAREVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

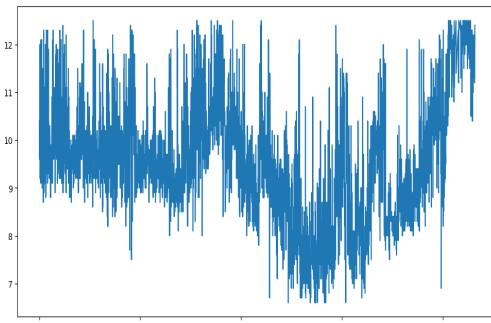
DETECTION OF ANOMAL EMISSIONS IN THE VALUES OF CURRENT INDICATIONS OF A PATIENT DURING ARTIFICIAL VENTILATION USING ORTHOGONAL POLYNOMIALS

The problem of identifying abnormal emissions and leveling their negative impact on the allocated significant characteristics of the calculated indicators necessary for accepting optimal values of ventilation flow parameters that ensure the most effective treatment of the patient is considered. To solve the problem, the article considers and applies a robust method based on the use of orthogonal polynomials.

Важной задачей длительной ИВЛ является постоянное поддержание оптимальных режимов вентиляции [1-3]. Одной из основных задач вычислительного комплекса программного обеспечения ИВЛ является определение оптимальных значений параметров вентилирующего потока аппарата ИВЛ в зависимости от значений параметров, характеризующих текущее состояние пациента[3]. В докладе приведены математическая схема и алгоритм выявления и фильтрации аномальных выбросов в значениях показаний пациента с помощью ортогональных полиномов [4]. Представлен метод, который позволяет выделять из рассматриваемой совокупности значений аномальные выбросы в динамическом режиме. На рис. 1 представлены исходные фиксируемые значения во времени показателя «минутная вентиляция легких» (MV) (рис. 1), на рис.2 отфильтрованные значения этого показателя.



Ruc.1



Ruc.2

Список литературы

1. Е.П. Ананьев, А.А. Полупан, И.В. Мацковский [и др.] Использование режима IntelliVent-ASV для поддержания целевого диапазона EtCO₂ у пациентов с тяжелой ЧМТ // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н.Н. Бурденко. – 2017. – Т. 81 (5 show promise in cancer diagnosis and treatment // Medical Xpress : сайт. – URL: <https://medicalxpress.com/news/2022-03-artificial-intelligence-machine-cancer-diagnosis.html>.
2. Ивахно Н.В., Минаков Е.И., Федоров С.С., Анцибор С.В. Математическое моделирование процессов в биотехническом комплексе «Аппаратура корректирующего воздействия - дыхательная система человека» // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №4.
3. С.Г. Климанов, Крянев А.В., Трикозова В.А., Царева Д.Д. Вычислительные схемы выявления аномальных выбросов в значениях текущих показаний пациента при искусственной вентиляции легких. Вестник НИЯУ МИФИ, т.13, №2, с. 76-82.
4. Крянев А.В., Лукин Г.В., Удумян Д.К. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2012. 308 с.

Е.В.КОРОТКОВ^{1,2}, М.А.КОРОТКОВА²

¹ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

ДИСПЕРСНЫЕ ПОВТОРЫ В ГЕНОМАХ РАЗЛИЧНЫХ БАКТЕРИЙ

Мы выполнили поиск дисперсных повторов IP методом в геномах бактерий из 39 phyla. В каждом геноме было выявлено семейство повторов с числом копий от 10^3 до 1.4×10^4 в зависимости от генома бактерии. Длины повторов лежат в диапазоне от 450 до 580 оснований. Более 90% найденных повторов наложены как мотив на кодирующие последовательности и повторы занимают от 30 до 50% бактериального генома. Повторы содержат консервативные островки которые чередуются слабо подобными районами. Мы предполагаем, что обнаруженные семейства повторов могут принимать участие в образовании бактериального нуклеоида.

E.V.KOROTKOV, M.A. KOROTKOVA

¹Research Center of Biotechnology of RAS, Moscow, Russia,

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

DISPERSED REPEATS IN THE GENOMES OF DIFFERENT BACTERIA

We performed a search for dispersed repeats by the IP method in the bacterial genomes of 39 phyla. In each genome, a repeat family with a copy number from 10^3 to 1.4×10^4 depending on the bacterial genome was identified. The repeat lengths range from 450 to 580 bases. More than 90% of the found repeats are superimposed as a motif on the coding sequences and the repeats occupy from 30 to 50% of the bacterial genome. The repeats contain conserved islands that alternate with weakly similar regions. We suggest that the detected repeat families may participate in the formation of the bacterial nucleoid.

Поиск дисперсных повторов является одной из задач биоинформатики. Эти исследования приобретают все большее значение так как становиться известно все больше секвенированных геномов как прокариот так и эукариот. Ранее мы разработали новый метод (IP метод) поиска дисперсных повторов в разнообразных геномах [1]. Этот метод позволяет найти дисперсные повторы в том случае, когда среднее число замен между любыми двумя повторами в расчета на одно основание (x) ДНК будет меньше 1.7. Все ранее разработанные методы поиска дисперсных повторов могут найти дисперсные повторы только для $x \leq 1.0$ [1]. Это означает, что впервые появилась возможность проверить существование семейств повторов в интервале $1.0 \leq x \leq 1.7$ как эукариотических так и в прокариотических геномах. Мы уже применили IP метод для поиска дисперсных повторов в геноме *E.coli*. Нам удалось показать, что в геноме *E.coli* присутствуют три семейства дисперсных повторов с числом копий более 10^3 . Эти повторы имеют длину от 400 до 600 оснований. Выявленные семейства повторов занимают приблизительно 2,3 миллиона оснований ДНК, что составляет примерно 50% от ее полного генома.

Возникает поэтому вопрос о том, содержат ли геномы других бактерий из различных phyla дисперсные повторы. Мы выбрали случайным образом по одному геному из каждой phyla (всего 39 геномов) и проанализировали их модифицированным IP методом [2]. Полученные результаты показывают, что геномы всех изученных бактерий содержат сильно дивергировавшие семейства повторов. Количество таких повторов колеблется от примерно 10^3 для генома *Spiroplasma poulsonii* до 14383 для генома *Gemmata obscuriglobus*. Полученные результаты показывают, что от 30 до 60% бактериальных геномов занимают дисперсные повторы. Длины найденных дисперсных повторов менялись от 450 до 580 оснований в зависимости от генома бактерии. Мы также провели поиск дисперсных повторов в случайных последовательностях и для них удается обнаружить от 0 до 9 дисперсных повторов на геном. Это показывает, что число ложных позитивов для полученных результатов менее 1%.

Мы сформировали также консенсусные последовательности для каждого семейства при помощи программы Weblogo. Эти результаты показывают, что повторы слабо подобны друг другу, но встречаются небольшие участки или отдельные позиции где наблюдается сильное подобие. Можно сказать, что повторы содержат консервативные островки которые чередуются слабо подобными районами. Подобие между консенсус последовательностями для различных бактерий отсутствует. Можно говорить о том, что найденные повторы являются специфичными для каждой бактерии

Можно предположить, что найденные в работе дисперсные повторы со слабым подобием могут быть участками связывания различных нуклеоид-ассоциированных белков и способствовать свертке бактериальной ДНК в nucleoid. Также можно думать, что обнаруженные семейства повторов могут принимать участие в создании жидкокристаллической структуры в составе ДНК бактерии.

Список литературы

1. E. Korotkov, Y. Suvorova, D. Kostenko, and M. Korotkova, "Search for Dispersed Repeats in Bacterial Genomes Using an Iterative Procedure," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, no. 13, p. 10964, Jun. 2023.
2. E. Korotkov and M. Korotkova, "Detection of Dispersed Repeats in the Genomes of Bacteria from Different Phyla," *IPSJ Trans. Bioinforma.*, vol. 17, pp. 55–63, Dec. 2024.

В.М.РУДЕНКО¹, Е.В.КОРОТКОВ^{1,2}

¹ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия; ²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБНАРУЖЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ПОВТОРОВ В РАСТИТЕЛЬНЫХ ГЕНОМАХ С ПОМОЩЬЮ ИР МЕТОДА

Метод ИР было применен нами для поиска дисперсных повторов (ДП) в геноме риса. Было сгенерировано 79 семейств повторов; общее число ДП в них составило 992,739. Проводилось исследование местоположения ДП в геноме, и было показано, что они в основном локализованы в некодирующих областях. Полученные данные сравнивались с ДП риса, детектированными ранее программным конвейером EDTA. Отмечается, что ИР метод обнаруживает гораздо большее число сильноразмытых ДП средней длины, чем существующие математические подходы.

V.M.RUDENKO¹, E.V.KOROTKOV^{1,2}

¹Research Center of Biotechnology of RAS, Moscow, Russia; ²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

DETECTION OF DISPERSED REPEATS IN PLANT GENOMES USING THE IP METHOD

The IP method was used to search for dispersed repeats (DRs) in the rice genome. 79 repeat families were generated; the total number of DRs in them was 992,739. The location of DRs in the genome was studied, and it was shown that repeats were mostly localized in noncoding regions. The data obtained were compared with rice DRs detected earlier by the EDTA software pipeline. It is noted that the IP method detects a much larger number of highly fuzzy DRs of average length than existing mathematical approaches.

Для эукариотических геномов характерна избыточность, обусловленная большим числом повторяющихся последовательностей. Дисперсные повторы (ДП) в геноме представлены в основном мобильными элементами, которые могут менять свое местоположение. Перемещаясь по геномной последовательности, они оказывают влияние на генетическую регуляцию, повышая приспособленность организма к изменениям окружающей среды.

Для поиска ДП в последовательностях ДНК было разработано много математических подходов, которые можно разделить на 2 большие группы. Методы первой группы сравнивают уже известные последовательности ДП с исследуемым геномом. Ограничение данных методов очевидно: они используют априорную информацию об уже известных классах ДП, и не могут обнаружить новые семейства. Вторая группа методов использует алгоритмы самосравнения или распределение k -меров. Однако все эти методы имеют существенное ограничение: они могут детектировать лишь последовательности с высокой степенью подобия. Если ввести параметр x - число замен на один нуклеотид, то можно сказать, что даже наиболее популярные методы достигают величины $x \leq 1.0$. Указанное ограничение возможно обойти, используя ИР метод [1]. Авторы показали, что он способен выявлять повторы со степенью дивергенции $x \leq 1.5$.

Мы применили ИР метод для определения ДП в геноме риса (*Oryza sativa*). Рис относится к высшим растениям, для которых характерно присутствие ДП. Кроме того, это наиболее распространенная сельскохозяйственная культура, и геном *O. sativa* хорошо изучен и аннотирован. Поэтому геном риса является подходящим объектом для исследования распространенности ДП.

Первый шаг ИР метода предполагал генерацию профилей семейств ДП по исходной последовательности. В качестве такой последовательности были взяты 6 и 11 хромосомы риса. Профили ДП строились так, чтобы длина повтора не превышала 600 н.п. На этом шаге были получены 80 профилей семейств. На втором шаге профили использовались для сканирования полного генома *O. sativa* с целью нахождения потенциальных ДП. Потенциальными ДП мы считали последовательности, которые при выравнивании с профильной матрицей имели статистическую значимость не менее заданной величины. На третьем шаге проводилось имитационное моделирование процесса поиска ДП на случайных последовательностях. При этом выбирался такой уровень статистической значимости, чтобы показатель False discovery rate (FDR) для каждого семейства не превышал 5%. После удаления незначимых ДП осталось 79 семейств, в которые вошли 992,739 ДП. При этом покрытие генома повторами составило 66,4%. Более детальное изучение локализации ДП показало, что они преимущественно расположены в некодирующих областях генома.

Далее была взята известная аннотация повторов *O. sativa* с сайта https://plants.ensembl.org/Oryza_sativa. Аннотация проводилась при помощи программного конвейера EDTA [2], который включает в себя 7 различных утилит. EDTA выявил 36 классов повторов, 4 из которых не относятся к категории дисперсных. Аннотированных дисперсных повторов (АДП) в оставшихся 32 классах содержится 386,672 штук; они покрывают 46,4% генома. Наблюдается принципиальное различие в длинах ДП, найденных ИР методом и АДП. Большинство АДП имеют длины 100-300 н.п. Распределение ДП демонстрирует 2 пика в диапазонах 100-300 н.п. и 530-600 н.п. Таким образом, метод ИР выявляет повторы средней длины, которые не распознает EDTA. Также были найдены пересечения ДП, определенные ИР методом, с повторами, аннотированными EDTA (АДП) и рассчитана корреляция между семейства ДП и классами АДП. В ряде случаях показана их сильная взаимосвязь.

Список литературы

1. Korotkov E., Suvorova Y. and others // Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol.24, 10964
2. Ou S., Su W., Liao Y. and others // Genome Biol. 2019. Vol 20, 275

К.Е. ШИЛЬНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБ ОДНОЙ СХЕМЕ ГОДУНОВСКОГО ТИПА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ НА АДАПТИВНЫХ СЕТКАХ

Предлагается подход для повышения точности численного моделирования процессов, описываемых уравнениями мелкой воды. Алгоритм основан на конечно-объемной аппроксимации задачи в подвижной системе координат. Локальная скорость системы координат определяется в соответствии со скоростями фронтов и амплитудами ударных волн и волн Римана, реализующихся в решении задачи о распаде разрыва для каждого узла расчетной сетки. Такой выбор системы координат позволяет повысить концентрацию узлов сетки вблизи особенностей решения.

K.E. SHILNIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ON ONE GODUNOV TYPE SCHEME FOR NUMERICAL SOLUTION OF THE CAUCHY PROBLEM FOR SHALLOW WATER EQUATIONS ON ADAPTIVE GRIDS

An approach is proposed to improve the accuracy of numerical modeling of processes described by shallow water equations. The algorithm is based on a finite-volume approximation of the problem in a moving coordinate system. The local velocity of the coordinate system is determined in accordance with the velocities of the fronts and the amplitudes of the shock waves and Riemann waves realized in the solution of the problem of the decay of a discontinuity for each node of the computational grid. Such a choice of the coordinate system allows increasing the concentration of grid nodes near the singularities of the solution.

В работе рассматривается задача Коши для системы одномерных уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} h + \frac{\partial}{\partial x} (hu) &= 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} (hu) + \frac{\partial}{\partial x} (hu^2 + \frac{1}{2} gh^2) = 0, \\ -\infty < x < +\infty, 0 < t < +\infty, \\ h(x, 0) = h_0(x), u(x, 0) &= u_0(x). \end{aligned}$$

Хорошо известно, что рассматриваемая задача допускает разрывные решения типа ударной волны а также непрерывные решения типа волны Римана. Особую роль играет задача Римана о распаде произвольного разрыва, где решение представляется комбинацией ударных волн и волн Римана, разделенных областями постоянных значений искомых функций [1].

Для повышения точности воспроизведения решения рассматриваемой задачи вблизи возникающих особенностей используется метод динамической адаптации [2], основанный на переходе в подвижную систему координат. Развивая подход, предложенный в [3], для рассматриваемой задачи в подвижной системе координат строится схема типа Годунова. При численном решении предполагается, что разрыв имеет место в каждом узле расчетной сетки. Скорость движения узлов сетки определяется в соответствии со скоростями фронтов и амплитудами ударных волн и волн Римана, реализующихся в решении задачи о распаде разрыва в этих узлах. Для предотвращения вырождения расчетной сетки выражение для скорости узлов дополняется регуляризирующим слагаемым.

Предложенный алгоритм тестируется на некоторых модельных задачах, отвечающих типовым конфигурациям начальных данных для задачи о распаде произвольного разрыва.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-71-00113).

Список литературы

1. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. // М.: Физматлит, 2001
2. Breslavskii P.V., Mazhukin V.I. // Mat. Model. 1995. 7(12), 48–78
3. Shilnikov K.E., Kochanov M.B. // J. Comput. Appl. Math. 2023. Vol. 421, 114884.

С.А. ЛАДЫГИН, Р.Н. КАРАЧУРИН, К.Е. ШИЛЬНИКОВ, П.Н. РЯБОВ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

О ПРИМЕНЕНИИ ПОДВИЖНЫХ СЕТОК К ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ СХЕМАМ ДЛЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В работе исследуется применение подвижных сеток при численном решении начально-краевой задачи для уравнения Хопфа. Рассмотрен метод, учитывающий характеристические направления, реализованный на подвижных и неподвижных сетках. Проведено сравнение численных результатов и выполнен анализ сходимости для обоих вариантов. Показано, что использование подвижных сеток позволяет достичь более высокого порядка сходимости при моделировании процесса формирования разрывов.

S.A. LADYGIN, R.N. KARACHURIN, K.E. SHILNIKOV, P.N. RYABOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ON THE APPLICATION OF MOVING GRIDS TO CHARACTERISTIC SCHEMES FOR HYPERBOLIC PROBLEMS

In this work, the application of moving grids in the numerical solution of an initial-boundary value problem for the Hopf equation is investigated. A method that takes into account characteristic directions is considered, implemented on both moving and fixed grids. A comparison of numerical results is conducted, and a convergence analysis for both approaches is performed. It is shown that the use of moving meshes allows achieving a higher order of convergence when modeling the process of shock formation.

Рассматривается уравнение Хопфа вида $\partial u / \partial t + u \partial u / \partial x = 0$, $x \in [x_{min}, x_{max}]$, $t > 0$ с начальным условием и граничными условиями Дирихле:

$$u(x, t=0) = \begin{cases} u_L, & x < x_L, \\ \frac{x_R - x}{x_R - x_L} u_L + \frac{x - x_L}{x_R - x_L} u_R, & x_L \leq x \leq x_R, \\ u_R, & x > x_R, \end{cases} \quad u(x_{min}, t) = u_L, \quad u(x_{max}, t) = u_R.$$

Здесь u_L, u_R, x_L, x_R — константы, такие что $u_L > u_R > 0$, $x_{min} < x_L < x_R < x_{max}$. Решением данной задачи является образующаяся со временем ударная волна.

Для использования подвижных сеток был применен метод динамической адаптации, который основан на переходе к новой системе координат. Такой подход позволяет формулировать задачу построения и адаптации расчетных сеток на дифференциальном уровне. В получаемой математической модели часть дифференциальных уравнений описывает физические процессы, а другая — поведение узлов сетки. Преобразование координат имеет вид $x = f(q, t)$, $t = \tau$, где q — расчетная координата. При переходе из одной системы координат в другую частные производные зависимых переменных связаны соотношениями $\partial / \partial t = \partial / \partial \tau + (Q/\Psi) \partial / \partial q$ и $\partial / \partial x = (1/\Psi) \partial / \partial q$, где $\Psi = \partial x / \partial q$ — якобиан обратного преобразования, называемый также функцией локальных деформаций, Q — функция, характеризующая скорость движения узлов.

Численное решение полученной задачи осуществляется методом, который учитывает направления численных потоков (конечные разности вперёд и назад) в зависимости от направления характеристик. Такой подход обладает хорошей устойчивостью при решении задач с гиперболическими системами, к классу которых относится и рассматриваемая система.

Сходимость оценивается в сеточной норме $\|u\|_{\Delta q, \Delta \tau} = \sum_{i,n} |u_i^n| \Psi_i^n \Delta q \Delta \tau$, через ошибку $E(\Delta q, \Delta \tau) = \|u - u_{exact}\|_{\Delta q, \Delta \tau}$, где Δq и $\Delta \tau$ — шаги по пространству и времени, u — численное решение, u_{exact} — точное решение.

Численные эксперименты показали, что для подвижных сеток порядок сходимости оказывается лучше, чем для неподвижных сеток.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ №25-21-00417

Список литературы

1. Мажукин А. В., Мажукин В. И. Динамическая адаптация в параболических уравнениях. //Журнал вычислительной математики и математической физики, 2007. Т. 47. №. 11. С. 1913-1936.

Э.М. УЛЬМАСКУЛОВ, К.Е. ШИЛЬНИКОВ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ДЛЯ СИСТЕМ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ НА КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЙ СЕТКЕ НЕСОГЛАСОВАННОЙ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА СРЕД

Рассмотрены различные численные методы реализации схемы третьего порядка для решения системы гиперболических уравнений для расчетной сетки несогласованной с границей раздела сред. Для одномерного случая рассматриваемой задачи исследована схема Русанова, и вычислена её сеточная сходимость. Основываясь на результатах моделирования для схемы Русанова реализован подход с сохранением теоретического порядка исходной схемы, взятой за основу. Проведено численное моделирование с использованием предложенного подхода.

E.M. ULMASKULOV, K.E. SHILNIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

GRID-CHARACTERISTIC METHOD OF THE THIRD ORDER FOR SYSTEMS OF HYPERBOLIC EQUATIONS ON A FINITE-DIFFERENCE GRID INCONSISTENT WITH THE INTERFACE OF MEDIA

Researched various third order numerical methods for system of hyperbolic-type equations in case of grid computational grid inconsistent with interface condition. For the one-dimensional case under consideration, Rusanov scheme is investigated and its grid convergence is calculated. Based on the results of the non-modified Rusanov scheme, an approach is implemented while maintaining the theoretical order of the initial scheme used as a basis. Numerical simulation using the proposed approach is carried out.

При численном моделировании физических процессов следует корректно учитывать границу перехода между средами. Одной из проблем в случае, когда расчетная сетка не согласована с границей сред, является сохранение теоретического порядка используемой схемы.

В работе рассмотрены несколько численных методов на примере одномерного уравнения акустики для случая разрывных коэффициентов, характеризующих среду. Для уравнений акустики искомый вектор значений состоит из двух величин: давления и скорости. В качестве базовой разностной схемы используется схема Русанова (рис.1) 3-го порядка [1].

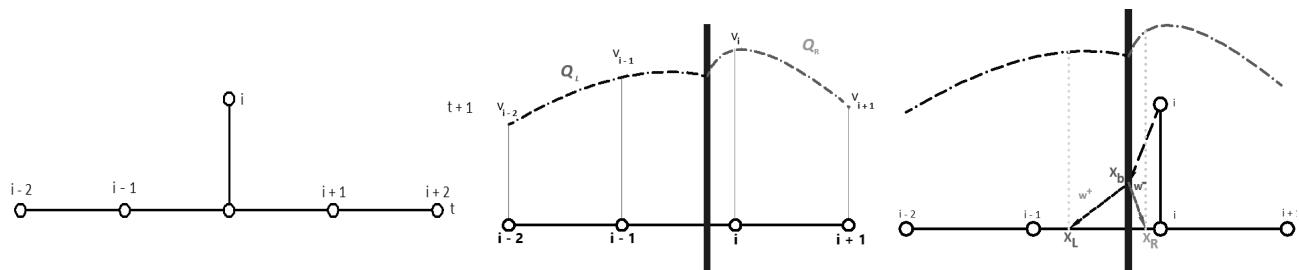


Рис. 1. Пяти точечная схема, пример построения полиномов скорости для расчета точки i справа от границы и характеристическая схема с учетом границы сред.

При использовании схемы Русанова без каких-либо модификаций, в области границы раздела сред порядок точности не превышает первого, хотя исходная схема имеет третий порядок. Для повышения порядка в области скачка коэффициентов предлагается модифицировать схему. Главной идеей для случая, когда в схеме (рис.1) часть узлов лежит по другую сторону границы, является построение интерполяционных полиномов третьей степени для скорости и давления, удовлетворяющих соотношениям на границе раздела сред и проходящих через узлы сетки по обе стороны от точки разрыва параметров среды (рис.1). Система для нахождения коэффициентов полиномов получается из значений в самих точках и соотношений в между коэффициентами, полученными на границе сред. При нахождении величин в узлах около границы используются значения исходя из построенных полиномов. Если характеристика пересекает разрыв, то в таком случае для нахождения значений, приходящих по характеристике, необходимо рассчитать значения в точке пересечения на границе. Это реализуется путем проведения из этой точки характеристик на предыдущий временной слой (рис.1). При тестировании полученного метода теоретический порядок совпал с полученным в ходе моделирования.

Список литературы

1. Русанов В.В. Разностные схемы третьего порядка точности для прямого вычисления разрывных решений // Докл. АН СССР. 1968. Т. 180. № 6. С. 1303–1305.

А.Г. ГОЛОВКОВ, П.Н. РЯБОВ, Н.А. КУДРЯШОВ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

О ЧИСЛЕННОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ ЧАВИ-ВАДДИ-КОЛОКОЛЬНИКОВА

В работе рассматривается уравнение Чави-Вадди-Колокольникова с дисперсией для описания бактериальных колоний. Предложена разностная схема для проведения численного моделирования смешанной краевой задачи для данного уравнения. Проведено тестирование предложенного алгоритма на точных решениях, полученных в работе [1]. Проведено математическое моделирование процессов, описываемых данным уравнением при различных значениях управляемых параметров.

A.G. GOLOVKOV, P.N. RYABOV, N.A. KUDRYASHOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

A NUMERICAL APPROACH TO SOLVING THE BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR THE CHAVI-WADDY-KOLOKOLNIKOV MODEL EQUATION

The Chavi-Waddy-Kolokolnikov equation with dispersion for describing bacterial colonies is considered. A difference scheme is proposed for numerical modeling of a mixed boundary value problem for this equation. The proposed algorithm is tested on exact solutions obtained in [1]. Mathematical modeling of the processes described by this equation is carried out for different values of the control parameters.

В работе рассматривается смешанная краевая задача для уравнения Чави-Вадди-Колокольникова о движении бактериальных колоний имеет вид [1], которое имеет вид:

$$u_t + u_{xx} + \sigma u_{xxx} + u_{xxxx} - \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_x u_{xx}}{u} \right) = 0$$

Предложена разностная схема для решения построения численного решения смешанной краевой задачи для данного уравнения с периодическими краевыми условиями. Для численного моделирования использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка точности и метод линий. В результате тестирования предложенный алгоритм продемонстрировал свою эффективность, что подтверждается совпадением результатов расчета с точными решениями задачи [1], см. Рис. 1

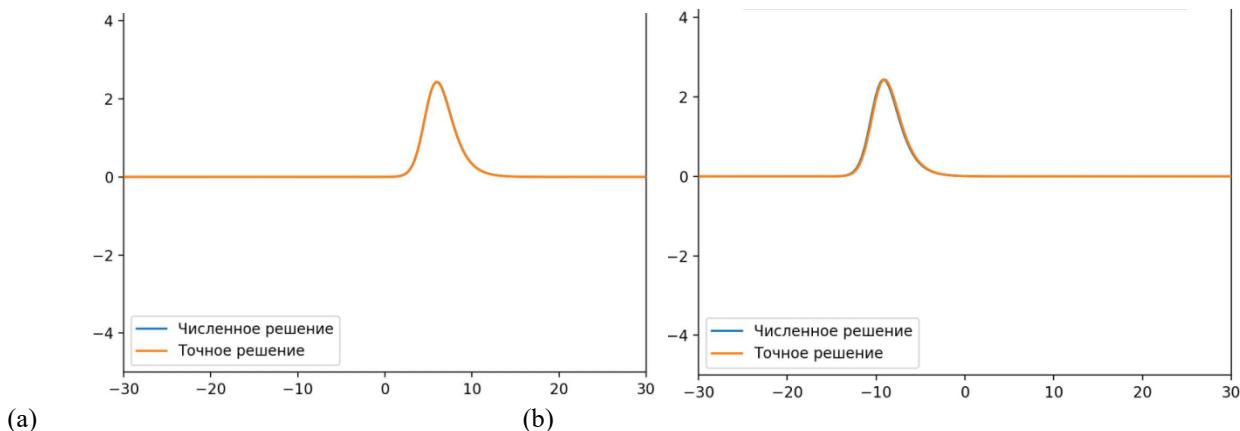


Рисунок 1 - сравнение численного и точного решений при $\sigma = 0.7$ и $\alpha = 1.5$, в момент времени $t = 40\text{с}$ (а) и $t = 150\text{с}$ (б)

Помимо этого, в работе проведено численное моделирование волновых процессов, описываемых уравнением Чави-Вадди-Колокольникова с учетом периодических краевых условий. Исследована зависимость влияния параметров задачи на характер волновых процессов.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ №25-21-00417.

Список литературы

1. Kudryashov N.A., Kutukov A.A., Lavrova S.F. Properties of the generalized Chavy-Waddy–Kolokolnikov model for description of bacterial colonies // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. — 2024. — Vol. 128. — P. 107645.

А.Р. ЛИМАН, М.А. ЧМЫХОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ В ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА OPENFOAM

В работе представлены результаты моделирования процессов распространения импульсов в оптических средах, описываемых нелинейным уравнением Шредингера (НУШ), с использованием программного пакета OpenFOAM. Разработан модифицированный решатель, позволяющий учитывать нелинейные эффекты и коэффициенты отражения. Проведена верификация модели путем сравнения численных результатов с аналитическими решениями и проверки сходимости на сгущающейся сетке. Изучено влияние параметров уравнения на результат. Проведено моделирование решения задачи для нелинейного уравнения Шредингера в двумерном случае.

A.R. LIMAN, M.A. CHMYKHOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MODELING OF PULSE PROPAGATION IN OPTICAL MEDIA USING THE OPENFOAM SOFTWARE PACKAGE

The study presents the results of modeling pulse propagation processes in optical media described by the nonlinear Schrödinger equation (NLSE) using the OpenFOAM software package. A modified solver was developed, enabling the consideration of nonlinear effects and reflection coefficients. The model was verified by comparing numerical results with analytical solutions and testing convergence on a refined mesh. The influence of the equation parameters on the outcomes was analyzed. Simulations were conducted to solve the nonlinear Schrödinger equation in a two-dimensional case.

Изучение характера распространения импульсов в оптических средах является одной из важных задач нелинейной оптики [1]. В настоящее время уделяется большое внимание изучению и моделированию данных процессов. Основная сложность моделирования процессов распространения импульсов в оптических средах связана с нелинейной природой их динамики, описываемой уравнениями типа нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Для численного решения таких задач требуется учет влияния параметров среды и нелинейных эффектов, что затрудняет применение стандартных программных средств.

В работе представлен модифицированный решатель на базе библиотек OpenFOAM, разработанный для решения задач, с уравнениями типа НУШ, включая случаи с произвольным коэффициентом отражения. Реализация базируется на модификации исходного решателя *laplacianFoam*. Измененный решатель позволяет учитывать как действительную, так и мнимую части функции волнового поля [3]. Для проверки разработанного подхода были выполнены сравнения численных результатов с аналитическими решениями модельных задач [1, 2].

Распределение комплексной функции описывается уравнением:

$$\psi(x,t)=T(x,t)+i\cdot TI(x,t),$$

где T и TI - соответственно действительная и мнимая части волнового поля. Разработанный решатель позволяет учитывать взаимодействие этих компонентов в рамках численной схемы.

Сходимость численного решения была проверена на сгущающейся сетке. Анализ показал, что ошибка моделирования уменьшается при уменьшении шага сетки. Также исследовано влияние параметров НУШ (коэффициента отражения и нелинейности) на форму и стабильность импульса.

Результаты численного моделирования продемонстрировали соответствие аналитическим решениям. Проведенное исследование подтвердило пригодность подхода для задач нелинейной оптики, в частности, моделирования процессов в оптических волноводах и телекоммуникационных системах.

Также в работе рассматриваются несколько подходов к решению задач НУШ в двухмерном случае. Построены расчетные сетки с различными параметрами, и исследовано влияние начальных условий на устойчивость решения.

Исследовались варианты корректировки расчетов, включая замену лапласиана на отдельные производные, но данный вариант показал уменьшение стабильности решения из-за накопления ошибок при увеличении числа операций. Выработаны рекомендации по подготовке решателей с использованием библиотек OpenFOAM.

Список литературы

1. Кудряшов Н. А. Методы нелинейной математической физики: учебное пособие / Н. А. Кудряшов.-М.: МИФИ, 2008 - 352 с.
2. Кан К.В., Кудряшов Н.А. Аналитическое и численное решение обобщенного нелинейного уравнения Шредингера с произвольным коэффициентом отражения // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2021. Т.10. № 5. С. 412–417.
3. Programming in OpenFOAM - Field initialization using codeStream // [wiki.openfoam.com](https://wiki.openfoam.com/Programming2). URL: <https://wiki.openfoam.com/Programming2>

Т.В. ЛИСЕЙКИНА

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ МИШЕНИ, ИОНИЗОВАННОЙ БИХРОМАТИЧЕСКИМ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

В данной работе на основе моделирования методом частиц в ячейках численно исследуется процесс генерации мощного терагерцового импульса при взаимодействии бихроматического циркулярно поляризованного лазерного импульса оптического или инфракрасного диапазона длин волн с аргоном. Терагерцовые импульсы, полученные по такой схеме, могут быть использованы для генерации сильных медленно меняющихся электрических и магнитных полей заданной конфигурации.

T.V. LISEYKINA

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SD RAS, Novosibirsk, Russia

THZ EMISSION FROM GASEOUS TARGET IONIZED BY A BICHROMATIC CIRCULARLY POLARIZED LASER PULSE: MODELING AND PIC SIMULATION

In this work, the generation of intense terahertz pulse in the interaction of two-color circularly polarized laser pulse of optical or in - frared wavelength range with argon is numerically investigated using particle-in-cell simulations. Terahertz pulses obtained by such a scheme can be used to generate strong slowly changing electric and magnetic fields of a given configuration.

Для моделирования макроскопического отклика плазмы, образующейся при ионизации газовой мишени бихроматическим лазерным импульсом, используется физико-математическая модель, основанная на полностью кинетическом описании плазмы, в которой динамика ионной и электронной компонент плазмы описывается кинетическими уравнениями Власова. Ионизация электрическим полем учитывается в рамках каскадного механизма с помощью формул для вероятности тунельной ионизации [1], в которую входит мгновенное значение напряженности электрического поля. Для решения уравнений Власова используется метод частиц-в-ячейках. При решении конечно-разностных уравнений движения частиц производится расщепление движения каждой частицы на движение под действием только электрического поля и только магнитного поля, при этом вычисление импульсов частиц выполняется в помощью схемы Бориса, которая обратима во времени и имеет второй порядок точности. Уравнения Максвелла для электрического и магнитного полей решаются с помощью явной конечно-разностной схемы с перешагиванием: искомые функции вычисляются на сдвинутых по пространству и времени сетках, что позволяет записать производные в виде центральных разностей и получить второй порядок аппроксимации по всем переменным. Схема обеспечивает автоматическое выполнение конечно-разностного аналога закона Гаусса для магнитного поля при условии его бездивергентности в начальный момент времени. Выполнение конечно-разностного аналога закона Гаусса для электрического поля гарантируется специальным алгоритмом вычисления плотности тока, при котором закон сохранения заряда в разностном виде выполняется точно [2]. Потери энергии, связанные с ионизацией учитываются введением "ионизационного тока", плотность которого такова, что его скалярное произведение с вектором электрического поля в каждой конкретной ячейке равно работе электрического поля, затраченной на ионизацию в этой ячейке в течение одного шага по времени. Использованная в работе модель позволяет самосогласованно вычислять плотность тока электронов, генерируемых при ионизации, включая обратную реакцию когерентного терагерцового (ТГц) излучения на динамику электронов плазмы. Результаты моделирования подтверждают гипотезу [3] о том, что при использовании циркулярно поляризованных лазерных импульсов с длиной волны 2-4 мкм возможно значительное увеличение эффективности преобразования инфракрасного (ИК) излучения в терагерцовое. Расчеты, проведенные для различных размеров газовых мишеней, показали, что при малых размерах газовой ячейки, сравнимых с длиной ТГц волны, внутри нее возбуждаются когерентные дипольные колебания, что тоже приводит к увеличению эффективности преобразования ИК лазерного излучения в ТГц сигнал. После быстрого испускания короткого ТГц импульса внутри мишени формируется нестационарное распределение токов и поля со сложной пространственной структурой, зависящей от размера мишени. Образовавшаяся при этом конфигурация плазмы оказывается практически безызлучательной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 24-21-00037. Расчеты проведены с использованием мощностей центра коллективного пользования "Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН" (ЦКП ВР МСЦ НИЦ «Курчатовский институт»), для тестирования алгоритмов и программ использованы ресурсы центра коллективного пользования "Сибирский суперкомпьютерный центр СО РАН".

Список литературы

1. В.С. Попов //УФН. 2004. Vol. 174, № 9; С.В. Попруженко, В.Д. Мур, В.С. Попов, Д. Бауэр // ЖЭТФ. 2009. Т. 135, вып. 6
2. J. Villaseñor, O. Bunemann//Comp.Phys.Comm. 1992. Vol. 69. № 306; T.Zh. Esirkepov//Comp.Phys.Comm. Vol. 135. № 144
3. M. Clerici et al.// Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110. id. 253901; V. A. Tulsky at al.// Phys. Rev. A. 2018. Vol. 98. id. 053415

Секция
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Руководитель секции

- к.ф.-м.н., доцент кафедры №21
Гаспарян Ю.М.

Секретарь секции

- инженер 1 категории кафедры №21
Бердникова М.М

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9321

E-mail: YMGasparyan@mephi.ru, mmberdnikova@mephi.ru

Е.А. КАШИКБАЕВ^{1,2}, Б.Ж.ЧЕКТЫБАЕВ^{1,2}, Д.А. ОЛЬХОВИК¹, О.А.СТЕПАНОВА², А.Ж. ДУЙСЕН¹, А.А
ЖАКСЫБАЕВА¹

¹Филиал Институт Атомной Энергии РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Казахстан

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА ТОКАМАКА КТМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В работе представлены результаты, полученные в ходе последних экспериментальных кампаний на токамаке КТМ, проведенных в 2024 году, также рассматриваются диагностический комплекс и представлена разработка концептуального дизайна диагностики томсоновского рассеяния КТМ

Ye.A. KASHIKBAYEV^{1,2}, B.Zh. CHEKTYBAYEV^{1,2}, D.A. OLKHOVIK¹, O.A. STEPANOVA²,
A.Zh. DUISEN¹, A.A. ZHAKSYBAEVA¹

¹Branch Institute of Atomic Energy of National Nuclear Center, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

²Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan

EXPERIMENTAL OF RESULTS STUDY OF PLASMA DISCHARGE OF TOKAMAK KTM USING A DIAGNOSTIC SYSTEM

The paper presents the results obtained from the latest experimental campaigns on the KTM tokamak conducted in 2024, also discusses the diagnostic suite and presents the development of a conceptual design for the KTM Thomson scattering diagnostics.

Казахстанский материаловедческий токамак (КТМ) представляет собой установку с магнитным удержанием плазмы, для получения высокотемпературной плазмы. Основными задачами исследований на токамаке КТМ являются проведение исследований взаимодействия материалов с высокотемпературной плазмой и испытания материалов первой стенки будущих термоядерных реакторов, которое способен обеспечить тепловые потоки сравнимые с ИТЭР [1].

В работе представлены результаты последних экспериментов на токамаке КТМ [2], проведенных в 2024 году. Плазменные разряды на токамаке КТМ осуществлялись в режиме омического нагрева. В результате проведенных экспериментов были получены стабильные плазменные разряды с диверторной конфигурацией.

В ходе проведенных экспериментов на токамаке КТМ были получены первые плазменные разряды с близкий к номинальному значению и приобретен уникальный опыт. Полученные данные и достигнутые параметры разряда позволяют перейти к экспериментам по достижению проектных значений плазменного разряда.

В предлагаемой работе также представлены разработка концептуального дизайна диагностики томсоновского рассеяния (ДТР) токамака КТМ, позволяющей в дальнейшем осуществлять прямой контроль профилей температуры и плотности плазмы в реальном времени и использовать полученные данные в контуре управления плазменным разрядом, которые позволяют перейти к экспериментам по достижению проектных значений плазменного разряда, для решения этой задачи требуется точное измерение радиальных профилей концентрации и электронной температуры плазмы [3]. В связи с этим, в настоящее время идет разработка ДТР, которая является наиболее надежным и достоверным средством для измерения вышеуказанных параметров плазмы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке научно-технической программы (ИРН №BR23891779 "Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на токамаке КТМ") Министерства энергетики Республики Казахстан.

Список литературы

1. I. L. Tazhibayeva, et al., "KTM Experimental Complex Project Status", Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 47, P.746 – 750.
2. Chektybayev B. et al. Improvement of plasma discharge performance at KTM tokamak //Fusion Engineering and Design. – 2024. – Т. 208. – С. 114684.
3. Ermakov N. V. et al. Divertor Thomson Scattering on Globus-M2 //Plasma Physics Reports. – 2023. – Т. 49. – №. 12. – С. 1480-1489.

Е.Ю. ТУЛУБАЕВ¹, В.Н. КУДИЯРОВ², И.Л. ТАЖИБАЕВА¹, А.В. ВЕРТКОВ³, М.Ю. ЖАРКОВ³,
Ю.Н. ГОРДИЕНКО¹, Ю.В. ПОНКРАТОВ¹, В.С. БОЧКОВ¹, А.Н. СЛУЯНОВ¹

¹Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Республика
Казахстан

²Томский политехнический университет, Томск, Россия

³АО «НИКИЭТ», Москва, Россия

ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МАКЕТА ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА НА ОСНОВЕ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В результате проведения испытаний системы охлаждения макета литиевого дивертора на основе парогазовой смеси низкого давления, при пике тепловой нагрузки равной $2,2 \text{ МВт}/\text{м}^2$, были получены временные зависимости температур макета при разных параметрах системы охлаждения. На основании данных зависимостей были определены оптимальные параметры системы охлаждения. Рассчитан коэффициент теплоотдачи для различных режимов работы системы охлаждения на основе парогазовой смеси.

Ye.Yu. TULUBAYEV¹, V.N. KUDIAROV², I.L. TAZHIBAYEVA¹, A.V. VERTKOV³,

M.Yu. ZHARKOV³, Yu.N. GORDIENKO, Yu.V. PONKRAТОV¹, V.S. BOCHKOV¹, A.N. SLUYANOV¹

¹Institute of Atomic Energy of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

²Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

³NIKIET JSC, Moscow, Russia

TESTING OF THE COOLING SYSTEM OF A LITHIUM DIVERTOR MOCK-UP BASED ON A LOW-PRESSURE STEAM-GAS MIXTURE

As a result of the cooling system tests of a lithium divertor mock-up based on a low-pressure steam-gas mixture, temperature-time dependencies of the mock-up were obtained at different cooling system parameters during a peak thermal load of $2.2 \text{ MW}/\text{m}^2$. Based on these dependencies, the optimal cooling system parameters were determined. The heat transfer coefficient was calculated for various operating modes of the cooling system based on the steam-gas mixture.

Последние данные научных исследований показывают, что поверхность дивертора термоядерного реактора будет подвергаться воздействию потока термоядерных нейтронов (14 МэВ) плотностью $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и теплового потока с плотностью от 5 до $20 \text{ МВт}/\text{м}^2$. Проведённый анализ возможности использования традиционных теплоносителей (газообразный гелий, вода, жидкие металлы) для систем охлаждения термоядерных реакторов показал, что конвективный механизм теплоотвода, характерный для однофазных теплоносителей, не позволяет отвести столь мощные тепловые потоки при допустимых параметрах давления и расхода с соблюдением безопасного режима эксплуатации.

Одним из решений вышеуказанной проблемы стало инновационное предложение российских ученых использовать для охлаждения внутрикамерных устройств в установках управляемого термоядерного синтеза (лимитер, дивертор, первая стенка) мелкодисперсную смесь воды и газа с низкими значениями давления [1,2]. Как показали проведенные исследования использование мелкодисперсного газоводяного диспергированного потока, обладающего высокими теплофизическими характеристиками, позволяет снизить давление в трактах охлаждения и иметь низкое объемное содержание воды в каналах охлаждения внутрикамерного элемента.

Таким образом, при конструировании и разработке нового модуля литиевого дивертора (МЛД) токамака КТМ свойства предлагаемого теплоносителя позволяют упростить конструкцию диверторного модуля и сделать работу с ним безопасной. Соответственно проведение стендовых испытаний с макетом МЛД с принципиально новой системой охлаждения являются актуальными с точки зрения, оценки эффективности данной системы в условиях воздействия высоких энергетических нагрузок.

В процессе испытаний системы охлаждения макета литиевого дивертора, использующего парогазовую смесь низкого давления, при пиковой тепловой нагрузке $2,2 \text{ МВт}/\text{м}^2$, были получены временные зависимости температур модели при различных параметрах системы охлаждения. На основе полученных данных были определены оптимальные параметры системы охлаждения. Также произведены расчёты коэффициента теплоотдачи для различных режимов работы системы охлаждения на основе парогазовой смеси.

Работа выполняется при поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан (ИРН – BR23891779 НТП «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ»).

Список литературы

1. Lyublinski I.E., Mirnov S.V., Komov A.T. et al., // J. of Physics: Conf. Series, 2017, V. 891(1), P. 012152.
2. Захаренков А.В., Локтионов В.Д., Дедов А.В. и др. Применение диспергированного газожидкостного потока для охлаждения энергонапряженных элементов конструкций. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4, с. 54—62; doi: 10.21517/0202-3822-2021-44-4-54-62.

Е.Д. МАРЕНКОВ^{1,2*}, Е.Г. КАВЕЕВА³, И.Ю. СЕНИЧЕНКОВ³, А.А. ПШЕНОВ⁴, П.С. СЕМЕНОВ²,
А.В. ГОРБУНОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

³ Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

⁴ ITER, Франция, шоссе Винон-сюр-Вердон, CS 90046, 13067, Сен-Поль Лез Дюранс

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОДА SOLPS 5.2 И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОКАМАКА Т-15МД В ЭТОМ КОДЕ

Представлены результаты первых расчетов пристеночной плазмы токамака Т-15МД в коде SOLPS-ITER с включенными дрейфами и токами.

E.D. MARENKOVA^{1,2*}, E.G. KAVEEVA³, I.YU. SENICHENKOV³, A.A. PSHENOV⁴, P.S. SEMENOV², A.V. GORBUNOV²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Academician Kurchatov Square, 1

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Politekhnicheskaya St., 29

⁴ITER, France, Vinon-sur-Verdon Highway, CS 90046, 13067, Saint-Paul les Durance

PHYSICAL MODEL OF SOLPS 5.2 CODE AND FIRST RESULTS OF SIMULATION OF TOKAMAK T-15MD WITH THIS CODE

The results of the first calculations of the T-15MD tokamak near-wall plasma in the SOLPS-ITER code with drifts and currents included are presented.

Разработка оптимальной конструкции дивертора современного токамака невозможна без численного моделирования диверторной области и пристеночной плазмы. Моделирование также помогает определить окно рабочих параметров дивертора, которое определяет возможные режимы работы токамака. Одним из самых часто используемых кодов для этих целей является код SOLPS. Этот код успешно применяется для моделирования большинства токамаков среднего размера, например, DIII-D, ASDEX-Upgrade, а также используется для моделирования токамака ITER.

В настоящей работе мы описываем современную физическую модель, используемую в коде SOLPS-ITER, и представляем первые результаты моделирования пристеночной плазмы токамака Т-15МД в коде SOLPS-ITER (SOLPS 5.2) с полным учетом дрейфов и токов (для краткости, далее просто «дрейфов»).

Рассмотрены режимы с мощностью, проходящей через сепаратор $P_{\text{sol}} = 6 \text{ МВт}$, и различными интенсивностями газонапуска H , соответствующими средней электронной плотности на сепараторе, $n_{\text{sep}} = 2 \cdot 10^{19} - 4.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Равновесие плазмы, посчитанное в коде ДИНА, для тока 1 МА, соответствует магнитной конфигурации DDN. При всех значениях газонапуска, внутренняя пластина дивертора находится в детачменте, а детачмент на внешней пластине наступает при $n_{\text{sep}} = 3.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Это значение n_{sep} совпадает с половиной предела плотности Гринвальда n_G , что означает, что практически детачмент на внешней пластине не достижим в рассмотренной конфигурации.

Качественно, эффект от учета дрейфов такой же, как на токамаках аналогичного размера, например, ASDEX-Upgrade. В целом, влияние дрейфов уменьшается с увеличением газонапуска и перехода в детачмент внешнего дивертора. При меньших значениях газонапуска $E \times B$ дрейф приводит к перетеканию водорода из внешнего дивертора во внутренний, что изменяет распределение нагрузки между пластинами дивертора: с учетом дрейфов максимальный поток тепла на внутренней пластине меньше, чем на внешней. Изменение электронной плотности на сепараторе, также вызванное $E \times B$ дрейфом, приводит к тому, что для достижения того же значения n_{sep} требуется больший газонапуск H , для практически достижимых режимов с $n_{\text{sep}} < n_G$. Кроме того, включение дрейфов приводит к немногим более позднему переходу в детачмент на внешнем диверторе.

Распределение углеродной примеси также заметно изменяется при учете дрейфов и токов. Включение дрейфов приводит к перетеканию углерода во внутренний дивертор, как и водорода. В результате, плотность С в холодной области SOL внутреннего дивертора, вытянутой в полоидальном направлении, увеличивается.

Обращают на себя внимание два новых эффекта, ранее не обсуждавшихся в литературе. Во-первых, мы показываем, с точки зрения оценки влияния дрейфов, величины n_{sep} и N_{tot} (полное количество водорода в обдирочном слое), не эквивалентны. N_{tot} является более показательной величиной. Во-вторых, видно, что включение дрейфов приводит к более ярко выраженному максимуму на зависимости $I_{\text{sat}}(n_{\text{sep}})$. Это происходит, в основном, из-за перераспределения излучения углеродной примеси.

А.А. СТЕПАНЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕСЬЮ ЛИТИЯ В ТОКАМАКЕ Т-15МД

Выполнено моделирование турбулентного переноса плазмы на периферии токамака Т-15МД при наличии примеси лития, поступающей в разряд в результате аблации пеллеты и испарения материала со стенки, с использованием дрейфово-редуцированной двумерной модели электростатической динамики пристеночной плазмы установки. Получены распределения потоков тепла и частиц на периферии токамака, найдены значения коэффициентов аномального переноса для дальнейшего применения в транспортном коде SOLPS.

A.A. STEPANENKO

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

NUMERICAL MODELING OF ANOMALOUS TRANSPORT IN PLASMA WITH Li IMPURITY AT THE EDGE OF TOKAMAK T-15MD

Turbulent plasma transport at the periphery of the T-15MD tokamak in the presence of lithium impurity entering the discharge as a result of pellet ablation and evaporation of material from the wall was simulated using a drift-reduced two-dimensional model of electrostatic dynamics of the facility edge plasma. Distributions of heat and particle fluxes at the periphery of the tokamak were obtained, estimates for the anomalous transport coefficients were found for further use in the SOLPS transport code.

Для описания переноса вещества и энергии на периферии современных токамаков широко используются транспортные коды, такие как SOLPS [1]. Замыкание уравнений переноса вещества в кодах подобного типа производится с использованием коэффициентов аномального переноса плазмы на периферии установки. Их определение требует применения численного моделирования турбулентной динамики пристеночной плазмы и последующего нахождения величины и распределения аномальных потоков частиц и тепла на границе плазменного шнура токамака. Пристеночная плазма, наряду с основным, водородным компонентом, может содержать также и примесные частицы, поступающие в разряд как со стенок реактора, так и в результате направленной инжекции (например, пеллет). При этом концентрация примеси в разряде может превышать порог, при котором её перенос может рассматриваться в следовом приближении.

К числу подобных случаев могут быть отнесены разряды на токамаках, оснащённых жидкокометаллическими элементами, такими как литиевая капиллярно-пористая система [2, 3]. Их применение рассматривается в качестве одного из перспективных методов для снижения критических тепловых нагрузок на стенки реактора, вызывающих их разрушение.

Недавно на базе НИЦ «Курчатовский институт» был введён в строй токамак Т-15МД [4]. Программа исследований на установке подразумевает, среди прочего, проведение материаловедческих исследований, в т.ч. в области физики взаимодействия потоков плазмы с жидкокометаллическими элементами конструкции токамака [5]. Оптимизация работы установки в режимах с использованием пластин, покрытыми жидким металлом, требует проведения моделирования как транспорта пристеночной плазмы, так и оценки величины и распределения аномальных потоков тепла и частиц на границе плазменного шнура.

В работе представлены первые результаты численного расчёта аномального переноса пристеночной плазмы токамака Т-15МД при поступлении в плазму потока примесных частиц лития. Представлены физическая и математическая модели транспорта плазмы, учитывающие наличие в среде примесных частиц в неследовых количествах. Перенос плазмы рассматривается в электростатическом приближении, уравнения переноса вещества дополнительно редуцированы для учёта преимущественно желобкового характера турбулентности на периферии токамака и высокой проводимости пристеночной плазмы. Представлены результаты моделирования поперечных потоков тепла и частиц на периферии токамака, получены усреднённые по времени профили плотности и температуры плазмы в условиях поступления лития как со стенки установки, так и в результате аблации пеллет при их направленной инжекции в область разряда. Определены значения аномальных коэффициентов диффузии и температуропроводности, которые могут быть в дальнейшем использованы при моделировании переноса плазмы в транспортном коде SOLPS.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-22-00158 в НИЯУ МИФИ, <https://rscf.ru/project/24-22-00158/>.

Список литературы

1. Kukushkin A. S. et al. // Fus. Eng. Design. 2011. V. 86. №. 12. P. 2865-2873.
2. Lyublinski I. et al // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 1156-1159.
3. Vertkov A. V. et al // Plasma Phys. Reports. 2021. V. 47. №. 12. P. 1245-1260.
4. Khvostenko P. P. et al. // Fus. Eng. Design. 2021. V. 164. P. 112211.
5. Khvostenko P. P. et al. // Phys. Atomic Nuclei. 2020. V. 83. P. 1037-1057.

А.А. СТЕПАНЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ ПРИ ИХ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ОБЛАСТЬ РЕЗОНАНСНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЕРИФЕРИИ ТОКАМАКА

Рассмотрено движение отдельных плазменных филаментов, образующихся внутри сепараторы токамака, через области резонансного возмущения магнитного поля. В рамках линейного приближения получен критерий на параметры плазмы филамента, при котором резонансное возмущение магнитного поля эффективно отклоняет филамент от первоначальной траектории и вызывает его декогеренцию. Результаты анализа сравниваются с данными численного моделирования в коде BOUT++ динамики филаментов на периферии токамака Т-15МД при наличии как отдельно расположенных областей резонансного возмущения магнитного поля, так и при формировании области стохастического магнитного поля.

A.A. STEPANENKO

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

PECULIARITIES IN DYNAMICS OF PLASMA FILAMENTS THROUGH THE REGION OF RESONANT MAGNETIC PERTURBATION AT THE TOKAMAK EDGE

The motion of isolated plasma filaments through the regions of resonant magnetic perturbations (RMP) at the tokamak edge is considered. Within the linear approximation, a criterion on the filament parameters, for which the RMP effectively deflects the filament from its trajectory and causes decoherence, is obtained. The analysis results are compared with the data from BOUT++ numerical modeling of the filament dynamics at the tokamak edge in the presence of an isolated RMP region and of a region with stochastic magnetic field lines.

Характерной особенностью турбулентности на периферии токамака является перемежаемость. Нелинейная динамика пристеночной плазмы сопровождается периодически формирующими выбросами вещества и энергии в форме филаментов – нитевидных токовых структур, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля и содержащих внутри себя плазму, плотность и температура частиц которой оказываются в несколько раз выше, чем у окружающей плазмы [1]. Поперечный перенос филаментов имеет недиффузионную природу и может вносить существенный вклад в совокупные аномальные потоки тепла и частиц на периферии установки [2].

Эксперименты показывают, что образование филаментов является универсальной чертой турбулентности горячей плазмы и происходит в результате насыщения флуктуаций, развивающихся на периферии плазменного шнура под действием широкого спектра плазменных неустойчивостей [3]. Одними из наиболее опасных для работы установки возмущений оказываются пристеночные локализованные моды (Edge Localized Modes [4]), развитие которых сопровождается выносом на стенку горячей плазмы из центральной области разряда, что приводит к экстремально высокими тепловым нагрузкам на обращенные к плазме элементы конструкции реактора и их разрушение.

Для подавления развития пристеночных локализованных мод в настоящее время широко используется метод формирования на периферии токамака областей резонансного возмущения магнитного поля, которым отвечает образование «карманов» в форме магнитных островов в топологии вложенных магнитных поверхностей установки. Наличие подобных областей эффективно подавляет развитие пристеночных локализованных мод [5], одновременно усиливая турбулентную активность на границе плазменного шнура.

Для изучения воздействия резонансных возмущений магнитного поля токамака на турбулентную динамику пристеночной плазмы в литературе был предложен ряд моделей, опирающийся на анализ коллективной динамики вещества, без выделения отдельных филаментов в структуре турбулентности. В работе представлен анализ движения изолированных филаментов через области резонансного возмущения магнитного поля на границе плазменного шнура установки. Рассматривается динамика филаментов, образующихся как результат обычной турбулентной активности, так и в результате развития пристеночной локализованной моды. В рамках линейного приближения получен критерий, выполнение которого необходимо для эффективного отклонения филамента от первоначальной траектории движения и декогеренции при прохождении области резонансного возмущения магнитного поля. Результаты анализа сравниваются с данными численного моделирования в коде BOUT++ переноса филаментов на периферии токамака Т-15МД при наличии как отдельно расположенных областей резонансного возмущения магнитного поля, так и при формировании области стохастического магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект Государственного задания № FSWU-2023-0031.

Список литературы

1. Krasheninnikov S. I. // Phys. Lett. A. 2001. V. 283. №. 5-6. P. 368-370.
2. Krasheninnikov S. I., D'Ippolito D. A., Myra J. R. // J. Plasma Phys. 2008. V. 74. №. 5. P. 679-717.
3. D'Ippolito D. A., Myra J. R., Zweben S. J. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. №. 6. P. 060501.
4. Zohm H. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1996. V. 38. №. 2. P. 105.
5. Gu S. et al. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. №. 2. P. 026012.

Н.В. КОРШУНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА СВЕРХМАЛОШУМЯЩЕЙ, ШИРОКОПОЛОСНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ С ВЫСОКИМ КОЭФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ ДЛЯ ИОННОГО ДЕТЕКТОРА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ

Рассмотрен энергетический анализатор диагностики как возможный источник помех, а также оценено влияние пространственного расположения пластин детектора на уровень его шума и разрешающую способность. Разработана инновационная архитектура системы сбора данных, показана принципиальная схема и результаты расчёта её рабочих параметров. Произведён тепловой расчёт и показан способ оптимизации трассировки платы системы сбора данных. Измерен её уровень шума и коэффициент усиления. Описана методология калибровки системы сбора данных.

N.V. KORSHUNOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF AN ULTRA-LOW NOISE, WIDE-BANDWIDTH, HIGH GAIN DATA ACQUISITION SYSTEM FOR AN ION DETECTOR IN HEAVY ION BEAM PROBE PLASMA DIAGNOSTICS

The energy analyzer used for diagnostics is examined as a potential source of interference, and the impact of the spatial arrangement of the detector plates on its noise level and resolution is evaluated. An innovative architecture for the data acquisition system has been developed, with a schematic diagram and calculated operational parameters presented. A thermal analysis has been conducted, and a method for optimizing the trace layout of the data acquisition system board is demonstrated. The noise level and gain factor of the system have been measured. Additionally, a methodology for calibrating the detector is described.

В современной физике плазмы диагностика зондирования пучком тяжелых ионов (ЗПТИ, англ. Heavy Ion Beam Probe – HIBP) является ключевым инструментом для исследования электрических полей и турбулентности плазмы тороидальных установок и открытых магнитных ловушек. Этот метод позволяет проводить локальные измерения электрического потенциала в высокотемпературной плазме, имея фундаментальное значение для физики плазмы [1].

Одним из важнейших элементов диагностики является система сбора данных ионного детектора, которая определяет полосу частот и "горизонт наблюдений" исследуемых колебаний в плазме. Разработка такой системы сбора данных представляет сложную техническую задачу, так как детектируемые токи находятся в диапазоне единиц и десятков нА, что близко к уровню теплового шума в исследуемом частотном диапазоне. Литературный анализ показал, что наилучшие достижения на сегодняшний день включают полосу пропускания 500 кГц и уровень шума 0,5 нА [2].

Созданная система сбора данных обеспечивает полосу пропускания 1400 кГц и уровень шума 0,2 нА. Она может быть использована в токамаке Т-15МД, так как диагностика пучком тяжёлых ионов предусмотрена в планах диагностических систем [3]. Принципиальным отличием разработанной системы является её архитектура: аналогово-цифровые преобразователи размещены непосредственно на плате детектора, что, предположительно, существенно снизит влияние помех на проводимые измерения. Это достигается благодаря значительно большей помехозащищённости цифрового сигнала по сравнению с другими системами, где чувствительный аналоговый сигнал передавался из-под вакуума по кабелю, неизбежно подверженому внешним электромагнитным помехам, вызванным работой токамака.

Численным экспериментом показано, что анодная пластина энергетического анализатора «плоское зеркало» может являться одним из источников внешних помех. А также, что поиск оптимальной величины входной ёмкости является важным с точки зрения компромисса между внутренними и внешними шумами. Исследованы взаимные ёмкости между пластинами и их вклад в снижение разрешения детектора, предложен способ снижения взаимной ёмкости и повышения помехоустойчивости. Показана необходимость чернения платы детектора, рассчитаны рабочие температуры в вакууме. Численно определён конус рабочего диапазона детектора.

Не меньшую сложность представляет собой калибровка разработанной системы сбора данных. Поскольку требуется генератор тока, подразумевающий обратную связь с использованием системы измерения тока, которая должна быть сопоставима по чувствительности с разработанной системой, что приводит к замкнутому парадоксу. В работе предложено техническое решение для такого прецизионного генератора тока, которое позволит осуществить калибровку детектора.

Предварительные измерения параметров системы показали уровень шума в 0,3 нА и коэффициент усиления $1,57 \cdot 10^7$ А/В.

Список литературы

1. Melnikov A.V. // Applied and fundamental aspects of fusion science. Nature Physics. 2016. Vol. 12. P. 386-390
2. Fimognari P.J., Crowley T.P., Demers D.R. // Development of a beam ion velocity detector for the heavy ion beam probe. Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87 (11), P. 11D414-3
3. Melnikov A.V., Sushkov A.V., Belov A.M. and others // Physical Program and Conceptual Design of the Diagnostics of the T-15 Upgrade Tokamak Fusion Engineering and Design 96–97 (2015) 306–310.

Н.С. СЕРГЕЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПОЛОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ КВАЗИКОГЕРЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-10 ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ

Представлена детальная частотная структура спектров мощности колебаний параметров плазмы токамака Т-10. Приведена оценка фазовой скорости полоидального вращения отдельных когерентных компонент спектров относительных колебаний плотности плазмы и электростатического потенциала плазмы с учётом эффекта невмороженности турбулентного потока плазмы. Дополнительно приведена оценка скорости вращения магнитных квазикогерентных колебаний.

N.S. SERGEEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ESTIMATION OF THE POLOIDAL FLOW VELOCITY OF QUASI-COHERENT FLUCTUATIONS OF T-10 TOKAMAK PLASMAS BASED ON HEAVY-ION BEAM PROBE DATA

A detailed picture of the power spectral density of T-10 plasma parameters is presented. The estimation of the poloidal phase velocity of separate coherent frequency components of the relative density and electrostatic plasma potential fluctuations spectra are given considering the non-frozen nature of the turbulent flow. Additionally, the propagation characteristics of quasi-coherent magnetic fluctuations are considered.

Спектр возмущений плазмы токамака может состоять из нескольких ярко выраженных компонент, включая как условно когерентные моды колебаний плазмы, занимающие узкую частотную полосу масштаба нескольких кГц, так и квазикогерентные моды, занимающие широкую частотную полосу масштаба нескольких десятков кГц [1]. Одной из современных проблем при определении влияния тех или иных видов возмущений горячей плазмы на характеристики её удержания в токамаке является определение скоростей вращения турбулентных структур, в частности их скорости полоидального вращения с учётом конечного времён жизни возмущения плазмы.

Традиционный подход к определению скорости вращения отдельных типов возмущений основан на двухточечном измерении флуктуаций параметров плазмы. Предполагается, что регистрируемое возмущение не успевает претерпеть значительных изменений при переходе от одной точки наблюдения к другой, т. е. структура возмущений изотропна, а их амплитуда мала. Так вычисленная кросс-корреляционная функция между двумя сигналами x и y , одновременно измеренными в двух точках плазмы R_{xy} может быть использована для определения скорости вращения возмущений плазмы. При этом вычислённая задержка распространения возмущения от точки к точке может оказаться достаточно малой, что даст завышенное значение скорости вращения, например в несколько раз превышающее скорость вращения плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. В таких случаях необходимо вводить поправку, связанную с эволюцией возмущения при переходе от одной точки наблюдения к другой.

В настоящей работе исследуется применение эллиптического приближения [2] для вычисления полоидальной скорости вращения возмущений плазмы, основанного на внесении поправки, связанной со сдвигом максимума R_{xy} и уменьшением его амплитуды в зависимости пространственного и временного разделения между областями измерений (рис. 1). Исследуется возможность использования огибающей R_{xy} связанной с квазикогерентной компонентой спектра с целью отдельного определения скорости вращения квазикогерентных колебаний плазмы.

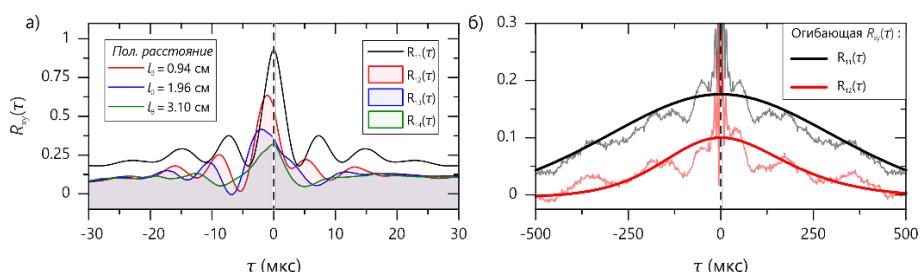


Рис. 1. (а) Семейство корреляционных функций вычисленных между сигналами, измеренными в различных точках плазмы при помощи системы зондирования пучком тяжёлых ионов. (б) Аппроксимация R_{xy} огибающей, связанной со спектром мощности низкочастотных квазикогерентных колебаний.

Список литературы

1. Sergeev N.S., Melnikov A.V., Eliseev L.G. Magnetic Component of Quasi-coherent Mode of Plasma Fluctuations in Ohmic Plasma of the T-10 Tokamak // Jett Lett. 2024.
2. Han X. et al. Application of the elliptic approximation model for the edge turbulence rotation measurement via the poloidal correlation reflectometer in Wendelstein 7-X // Nucl. Fusion. IOP Publishing, 2021. Vol. 61, № 6. P. 066029.

А.С. ДРОЗД^{1,2}, Д.С. СЕРГЕЕВ¹, Р.А. БЕГИШЕВ^{1,3}, Т.Б. МЯЛТОН¹, К.А. РОГОЗИН^{1,4}, Д.В. САРЫЧЕВ¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет «МФТИ», Долгопрудный, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

НАБЛЮДЕНИЕ МГД НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ПИЛООБРАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-15МД С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Продемонстрировано влияние МГД возмущений и пилообразных колебаний на сигнал СВЧ-интерферометра в плазме токамака Т-15МД. Большая точность измерений и высокое быстродействие СВЧ-интерферометра позволили наблюдать эти эффекты. Показана корреляция с данными других диагностических систем.

A.S. DROZD^{1,2}, D.S. SERGEEV¹, R.A. BEGISHEV^{1,3}, T.B. MYALTON¹, K.A. ROGOZIN^{1,4},
D.V. SARYCHEV¹

¹National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³National Research University MIPT, Dolgoprudny, Russia

⁴National Research University MPEI, Moscow, Russia

OBSERVATION OF MHD INSTABILITIES AND SAWTOOTH OSCILLATIONS OF THE T-15MD TOKAMAK PLASMA USING A MICROWAVE INTERFEROMETER

The influence of MHD disturbances and sawtooth oscillations on the signal of the microwave interferometer in the T-15MD tokamak plasma is demonstrated. High measurement accuracy and excellent temporal resolution of the microwave interferometer allow observing these effects. Correlation with data from other diagnostic systems is shown.

На токамаке Т-15МД [1] для измерения средней электронной концентрации используется СВЧ-интерферометр с длиной волны зондирующего излучения 0,935 мм [2]. Измерения проводятся на промежуточной частоте 5 МГц, для обработки сигналов используется фазометр на базе фазовых детекторов AD8302 и контроллера STM32 [3]. Плазма зондируется по вертикальной хорде через центр вакуумной камеры токамака Т-15МД. Линейная плотность плазмы n_l измеряется СВЧ-интерферометром с точностью $2 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$ [4].

В работе представлены полученные с помощью СВЧ-интерферометра данные о линейной концентрации электронов в плазменных разрядах токамака Т-15МД. Продемонстрировано, что в этих сигналах наблюдается влияние МГД возмущений (рис. 1) [5] и пилообразных колебаний (рис. 2), что стало возможным благодаря большой точности измерений и высокому быстродействию фазометра.

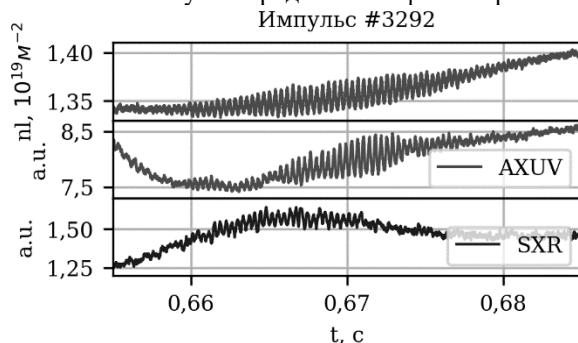


Рис. 1. МГД возмущения на сигналах СВЧ-интерферометра, AXUV и SXR

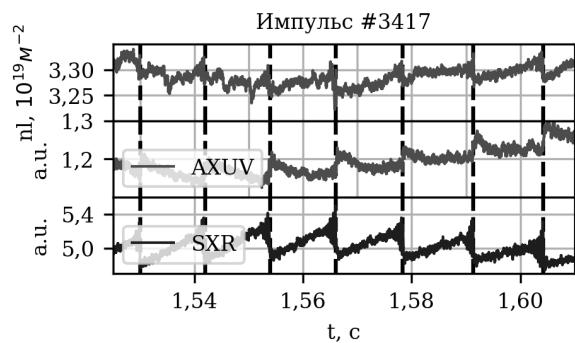


Рис. 2. Пилообразные колебания на сигналах СВЧ-интерферометра, AXUV и SXR

Данные СВЧ-интерферометра коррелируют с сигналами диагностики радиационных потерь (AXUV) [6] и системы многокурсовых измерений мягкого рентгеновского излучения (SXR) [7] токамака Т-15МД.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Хвостенко П.П. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. т. 42, вып. 1, с. 15—38.
2. A. S. Drozd and others // Plasma Physics Reports. 2024. Vol. 50, № 5, P. 568–572.
3. Drozd A.S., Sergeev D.S. // Rev. Sci. Instrum. 2022. Vol. 93, № 6, P. 063501.
4. Дрозд А.С., Сергеев Д.С. и др. // ДВП: тезисы докл. 2023. с. 269–271.
5. Peiwan Shi et al // Plasma Sci. Technol. 2016. Vol.18, № 7, P. 708
6. Сарычев Д.В. и др. // 51 Международная Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС: тезисы докл. 2024. с. 292.
7. Рогозин К.А. и др. // 51 Международная Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС: тезисы докл. 2024. с. 103

^{1,2}ИЗАРОВА А.Д., ¹БАЛАШОВ А.Ю., ^{1,2}ДРОЗД А.С., ¹БЕЛОВ А.М., ¹ЕЛИСЕЕВ Л.Г., ^{1,3}САРАНЧА Г.А.,
¹СТЕОПИН А.В., ¹СУШКОВ А.В.

¹НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МГД-ДИАГНОСТИКИ Т-15МД

В работе представлены первые результаты обработки экспериментальных данных магнитных зондов и определения модового состава МГД-активности в плазме токамака Т-15МД. Получены данные о динамике развития МГД-возмущений в частотном диапазоне 0 - 10 кГц и предварительная информация о пространственной структуре наиболее крупных мод. Результаты обработки сигналов магнитных зондов согласуются с данными многоканальной диагностики мягкого рентгеновского излучения и одноканальной интерферометрии.

^{1,2}IZAROVA A.D., ¹BALASHOV A.Yu., ^{1,2}DROZD A.S., ¹BELOV A.M., ¹ELISEEV L.G., ^{1,3}SARANCHA G.A.,
¹STEOPIN A.V., ¹SUSHKOV A.V.

¹NRC ‘Kurchatov Institute’, Moscow, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (NIU), Dolgoprudnyi, Russia

THE T-15MD MHD DIAGNOSTIC SIGNAL PROCESSING RESULTS

The paper presents the first results of magnetic probes experimental data processing and determining the mode composition of MHD activity in the plasma of the tokamak T-15MD. The dynamics of the development of MHD disturbances in the frequency range of 0-10 kHz and preliminary information on the spatial structure of the largest modes have been obtained. The results of the magnetic probe signal processing are consistent with data from multichannel soft X-ray diagnostics and single-channel interferometry.

Приведены примеры эволюции МГД-возмущений при развитии разряда. Отмечается хорошая корреляция спектральных плотностей мощности сигналов магнитных зондов с сигналами: интерферометра, измеряющего хордовую электронную плотность плазмы; детектора мягкого рентгеновского излучения. Представлено поведение сигналов магнитных зондов при развитии запертой моды. Приведены примеры взаимодействия тиринг-мод с пилообразными колебаниями и связанными с ними вспыхивающими МГД-возмущениями с полоидальным модовым числом $m = 1$.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

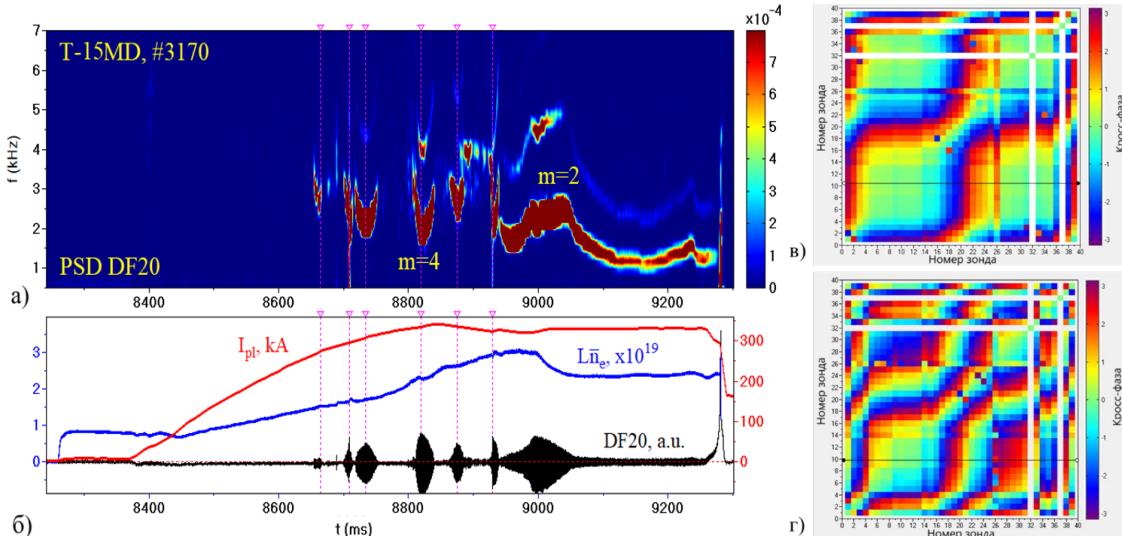


Рис. 1 а - Спектрограмма плотности мощности сигнала магнитного зонда №20; б - Ток плазмы, хордовая электронная плотность плазмы и сигнал магнитного зонда №20; в, г - Кросс-фазовые матрицы, соответствующие возмущениям $m = 2$ и $m = 4$.

Список литературы

- [1]. Белов А.М., Макашин И.Н. //Физика плазмы, 2004, **30**, №2, С. 195.
- [2]. Melnikov A.V. et al. //PPCF, 2015, **57**, №. 6, P. 065006.
- [3]. Мережкин В. Г. //Физика плазмы, 1978, **4**, № 2, С. 275.
- [4]. Изарова А.Д. и др. //Сборник тезисов LI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород 18-22 марта 2024, С. 78.
- [5]. Sushkov A.V., Belov A.M. et al. //Fusion Engineering and Design, **146**, Part A, September 2019, P. 383.

А.А. ЛОГИНОВ^{1,2}, Д.А. ШЕЛУХИН², В.А. ВЕРШКОВ², И.А. ВЛАДИМИРОВ^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

РАБОЧАЯ ОБЛАСТЬ И СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ-ШУМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ Т-15МД В РЕЖИМАХ ЗОНДИРОВАНИЯ НА О- И Х-ВОЛНЕ

Корреляционная рефлектометрия – одна из диагностик, разрабатываемых для исследования турбулентности в плазме токамака Т-15МД. Работа посвящена определению областей плазмы, доступных для зондирования с предполагаемых ракурсов, а также оценке диапазона измеряемых флуктуаций электронной плотности. Показано отсутствие существенных ограничений, препятствующих реализации диагностики на Т-15МД.

А.А. LOGINOV^{1,2}, Д.А. SHELUKHIN², В.А. VERSHKOV², И.А. VLADIMIROV^{1,2}

¹National Research University “Moscow Institute of Physics and Technology”, Russia

²National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

OPERATIONAL LIMITS AND SIGNAL-TO-NOISE RATIO OF THE CORRELATION REFLECTOMETER ON THE T-15MD TOKAMAK

Correlation reflectometry is one of the diagnostics being developed to study turbulence in the plasma of the T-15MD tokamak. The work is devoted to determining the plasma regions available for probing from the expected angles, as well as estimating the range of measurable electron density fluctuations. It is shown that there are no significant limitations preventing the realization of diagnostics on the T-15MD.

При изучении высокотемпературной плазмы в токамаке особый интерес представляет исследование турбулентности и процессов аномального переноса частиц и тепла в разряде. Одним из методов диагностики мелкомасштабных флуктуаций плотности является корреляционная рефлектометрия. В основе метода лежит зондирование плазменного шнура электромагнитной волной в области частот от 20 до 100 ГГц. Флуктуации набега фазы волны, отражённой от плазмы, позволяют судить о параметрах возмущений электронной плотности в окрестности поверхности отражения (отсечки).

Данная работа посвящена анализу физических ограничений при работе рефлектометрии на установке Т-15МД. Первое ограничение связано с поглощением волны при прохождении областей электронно-циклотронного резонанса. Второе – ограничение максимальной измеряемой амплитуды флуктуаций плотности, связанное с предельным возмущением набега фазы отраженной волны [2]. Помимо этого, для некоторых конфигураций антенной системы была рассчитана связь антенн в вакуумном приближении, что позволило оценить ожидаемое соотношение сигнал-шум диагностики (далее – SNR).

Для типичных сценариев разряда в Т-15МД с торoidalным полем в 1,5 и 2,0 Тл проанализированы варианты зондирования в направлении магнитной оси из экваториального и наклонного портов со стороны слабого магнитного поля, а также из верхнего вертикального патрубка. Анализ проведён для работы рефлектометра как на обыкновенной (O-), так и на необыкновенной (X-) волне. Показано, что в обоих случаях при измерениях из экваториального и наклонного портов в плазме существуют области недоступности, однако в определённых сценариях плазменный шнур может быть прозрачен вплоть до центральных зон. Комбинирование измерений на O- и X-волнах расширяет возможную область наблюдения. При измерениях из вертикального патрубка существенных ограничений на область наблюдения нет. Максимальная измеряемая амплитуда флуктуаций плотности электронов в центральной и градиентной частях плазмы составляет 0,2 – 0,6 %, а на периферии достигает 1 – 5 %, в зависимости от режима зондирования.

Установлено, что при значении SNR ~ 50 дБ и выше возможны измерения флуктуаций фазы вплоть до погрешности IQ-детектора ($0,1^\circ$). При более слабом уровне принимаемого сигнала (SNR ~ 30 дБ) эта граница повышается до $\sim 6^\circ$. Показано, что для зондирования вдоль экватора со стороны слабого поля соотношение сигнал-шум оказывается не хуже 50 дБ в большинстве возможных сценариев. При измерениях из верхнего патрубка ожидается высокая чувствительность связи антенн к положению и форме плазменного шнура, что приводит к снижению соотношения сигнал-шум. Эффект вызван существенным отличием угла отражения волны от нормали к поверхности отражения.

Проведённый анализ показал отсутствие существенных проблем для реализации диагностики «корреляционная рефлектометрия» на токамаке Т-15МД.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт»

Список литературы

1. Mazzucato E., Nazikian R., Rev. Sci. Intrum., 1995, 66 (2), p. 1237-1240
2. Шелухин Д. А., Субботин Г. В., Вершков В. А., Владимиrow И. А. Анализ физических и инженерных возможностей для реализации диагностики «рефлектометрия» на установке Т-15МД // Физика плазмы, 2022, 48(7), с. 579–598.

А.И. АРИСТОВ^{1,2}, В.И. ТЕПИКИН^{1,2}, П.В. САВРУХИН^{1,2}, Е.А. ШЕСТАКОВ¹, П.Д. ЛИСОВОЙ¹, А.В. ХРАМЕНКОВ¹

¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия,
e-mail: AristovAI@nrcki.ru, nrcki@nrcki.ru

²НИУ «Московский Энергетический Институт», г. Москва, Россия

АНАЛИЗ СИГНАЛОВ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРИ РАЗВИТИИ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Для изучения образования и развития пучков ускоренных электронов на токамаке Т-15МД оборудована система нейтронной диагностики. Описан состав системы. Приведены различные результаты измерения потоков нейтронов в экспериментах на токамаке Т-15МД. Приведен анализ полученных сигналов диагностики.

A.I. ARISTOV^{1,2}, V.I. TEPIKIN^{1,2}, P.V. SAVRUKHIN^{1,2}, E.A. SHESTAKOV¹, P. D. LISOVOY¹,
A.V. KHRAMENKOV¹

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia,
e-mail: AristovAI@nrcki.ru, nrcki@nrcki.ru

²NRU «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

ANALYSIS OF NEUTRON DETECTOR SIGNALS DURING THE DEVELOPMENT OF ACCELERATED ELECTRON BEAMS ON THE T-15MD TOKAMAK

To study the formation and development of accelerated electron beams, the T-15MD tokamak is equipped with a neutron diagnostic system. The composition of the system is described. Various results of measuring neutron fluxes in experiments on the T-15MD tokamak are presented. An analysis of the received diagnostic signals is presented.

Важной задачей диагностики термоядерной плазмы является измерение потоков нейтронов и их спектров. Нейтронная диагностика может предоставлять информацию о генерации фотоннейтронов и развитии пучков ускоренных электронов в том числе при работе с водородной плазмой, в отсутствие термоядерных реакций [1].

В ходе работы токамаков в определённых режимах работы электроны могут разгоняться до энергий в несколько десятков МэВ. При взаимодействии пучков ускоренных электронов с камерой установки, генерируется тормозное излучение больших энергий. Рентгеновское тормозное излучение, в свою очередь, при достижении достаточных энергий может вступать в фотоядерные реакции с выделением нейтронов, называемых «фотоннейтронами» [2].

На токамаке Т-15МД был установлен прототип нейтронной диагностики. Диагностика может использоваться для отработки технических решений и алгоритмов обработки данных для работы с изотопами водорода на токамаке ТИН, а также в случае работы с изотопами водорода на Т-15 МД. В систему входит набор газоразрядных нейтронных счетчиков типа СНМ. В ходе предварительных экспериментов с системой, была обнаружена связь сигналов на мониторах жесткого рентгеновского излучения и на мониторах нейтронного излучения. Для оценки вклада различных типов излучения в сигнал мониторов требуется сопоставление сигнала нескольких детекторов, для чего были установлены два счетчика СНМ, окруженных полиэтиленовым замедлителем, для повышения их чувствительности. Помимо этого, один счетчик дополнительно экранировался от рентгеновского излучения слоем свинцовой защиты.

В ходе экспериментов при сравнении уровня сигнала на детекторах наблюдалась различная загруженность защищенного и незащищенного детекторов. Наблюдалось как уменьшение уровня сигнала на экранированном свинцом детекторе, так и его увеличение в некоторых импульсах. Причиной различия уровня сигналов на двух детекторах может быть вызвано как нечувствительностью нейтронных детекторов к фотонам определённых энергий, эффективной экранировкой рентгеновского излучения свинцовой защитой, так и усилением потока нейтронов вследствие создания дополнительных нейтронов в ходе фотоядерных реакций, и реакций ($n, 2n$), а также различной направленностью потока нейтронов и фотонов.

Дополнительно, разработана программа для расчета потока фотоннейтронов по параметрам ускоренных электронов и мишени для случая экранировки различной толщины для анализа сигналов нейтронных детекторов, а также программа для обработки сигналов нейтронных детекторов.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. J. Bielecki, A. Kurowski, Neutron Diagnostics for Tokamak Plasma: From a Plasma Diagnostician Perspective // Journal of Fusion Energy doi: 10.1007/s10894-018-0195-9
2. R. Montalbetti, L. Katz, J. Goldemberg, Photoneutron Cross Sections // Physical Review, 1953. – V. 91, №3. 653-673 p.

В.И. ТЕПИКИН^{1,2}, П.В. САВРУХИН^{1,2}, Е.А. ШЕСТАКОВ¹, А.И. АРИСТОВ^{1,2}, П.Д. ЛИСОВОЙ¹,
А.В. ХРАМЕНКОВ¹

¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия,

e-mail: Tepikin_VI@nrcki.ru, nrcki@nrcki.ru

²НИУ «Московский Энергетический Институт», г. Москва, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Для изучения формирования и развития пучков ускоренных электронов на токамаке Т-15МД оборудована система регистрации жесткого рентгеновского излучения. Описана конструкция системы регистрации. Приведены результаты измерения спектров жесткого рентгеновского излучения в первых экспериментах на токамаке Т-15МД в режимах с ЭЦР инициацией разряда.

V.I. TEPIKIN^{1,2}, P.V. SAVRUHKHIN^{1,2}, E.A. SHESTAKOV¹, A.I. ARISTOV^{1,2}, P. D. LISOVY¹,
A.V. KHRAMENKOV¹

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia,

e-mail: Tepikin_VI@nrcki.ru, nrcki@nrcki.ru

²NRU «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

MEASUREMENTS OF HARD X-RAY RADIATION SPECTRA ON T-15MD TOKAMAK

To study the formation and development of accelerated electron beams, tokamak T-15MD is equipped with Hard X-Ray radiation registration system. The design of the registration system is described. The results of Hard X-Ray radiation spectra in the first experiments on the T-15MD in discharges with ECR initiation are presented.

Пучки ускоренных электронов могут повреждать первую стенку и дивертора токамака. Развитие пучков ускоренных электронов сопровождается генерацией тормозного излучения с энергиями до десятков МэВ. Детектирование рентгеновского излучения в комбинации с модельными расчётом позволяет получить важную информацию о развитии пучков ускоренных электронов внутри плазменного шнуря.

На токамаке Т-15МД создана система регистрации жесткого рентгеновского излучения, состоящая из монитора $NaI(Tl)$ и двух спектрометрических детекторов $LaBr_3(Ce)$, расположенных в коллимационной системе [1].

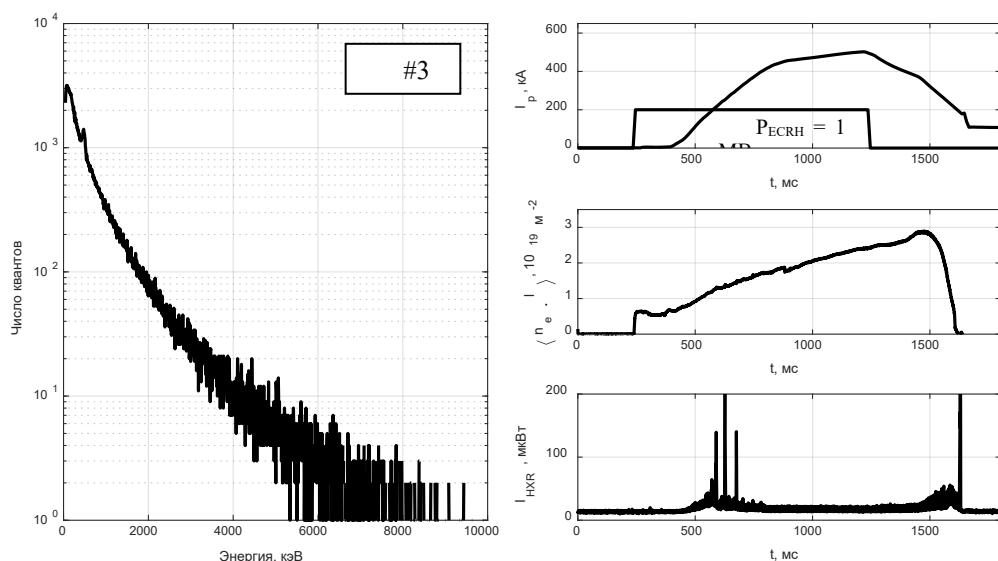


Рис. 1. Спектр жесткого рентгеновского излучения пучков ускоренных электронов в импульсе #3088.

Приведены временные зависимости тока плазмы I_p , интегральная (по вертикальной хорде) плотность $\langle n_e \rangle$ и интенсивность жесткого рентгеновского излучения I_{HXR} .

В первых экспериментах на токамаке Т-15МД в режимах с ЭЦР инициацией разряда (P_{ECRH} до 1 МВт) измерены спектры жесткого рентгеновского излучения пучков ускоренных электронов. Максимальная энергия ускоренных электронов E_{MAX} определяется по спектру жесткого рентгеновского излучения при аппроксимации экспонентой $\sim \exp(E/E_{MAX})$. Максимальная энергия ускоренных электронов достигала 8 МэВ.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. V.I. Tepikin, et.al., Hard X-Ray Collimation System at the T-15MD Tokamak // Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 10, pp. 1189–1197. DOI:10.1134/S1063780X24601172

С.Н. СТОЛБОВ¹, А.В. ОГИНОВ¹, В.А. ВАРЛАЧЕВ², И.М. АНФИМОВ³, С.П. КОБЕЛЕВА³, НЕКРАСОВ⁴,
Ю.В. ДРОБЫШЕВСКИЙ⁵, А.В. КОРЖЕНЕВСКИЙ⁵

¹Физический институт академии наук им. П.Н. Лебедева РАН,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

⁴Центральный экономико-математический институт РАН, ⁵ООО Протиус.

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С НЕЙТРОННЫМ ПРОГРЕВОМ (³He-D-T) ПЛАЗМЫ

Предложено создание термоядерных реакторов с внутренним нейтронным разогревом плазмы при взаимодействии нейтронов с D и ³He топливным составом с каталитически стабилизированным процессом горения. Топливный цикл реактора замкнут по тритию, гелию-3 и по нейtronам, которые выгорают и возвращаются в систему вновь. В открытой магнитной ловушке топливный состав вводят, нагревают, плазму удерживают, выводят.

S.N. STOLBOV¹, A.V. OGINOV¹, V.A. VARLACHEV², I.M. ANFIMOV³, S.P. KOBELEVA³, NEKRASOV⁴,
Yu.V. DROBYSHEVSKY⁵, A.V. KORZHENEVSKY⁵

¹Lebedev physical institute of RAS,

²National research Tomsk polytechnic university,

³National research technological university "MISiS",

⁴Central economic and mathematical institute of RAS, ⁵Proteus LLC.

THE CONCEPT OF CREATING A THERMONUCLEAR REACTOR WITH NEUTRON HEATING (³He-D-T) PLASMA

It is proposed to create thermonuclear reactors with internal neutron heating of plasma by the interaction of neutrons with D and ³He fuel composition with a catalytically stabilized combustion process. The reactor's fuel cycle is closed for tritium, helium-3 and neutrons, which burn out and return to the system again. In an open magnetic trap, the fuel composition is introduced, heated, the plasma is retained, and discharged.

Предложено создание термоядерных реакторов с каталитически обеспеченным подходом к реализации термоядерной реакции высокой удельной мощности и динамически устойчивой. В реакторе идет внутренний нейтронный разогрев плазмы при взаимодействии n с D и ³He топливным составом с каталитически стабилизированным процессом горения. Топливный состав нагревают при его взаимодействии с нейтронами, рождающимися в плазме которые возвращают тепловыми. Образующуюся плазму удерживают, выводят и ускоряют вдоль магнитного поля. Топливный цикл реактора замкнут по тритию, гелию-3 и по нейтронам. В процессе работы они выгорают и нарабатываются вновь. Крайне важно, что у системы (n-³He-D-T) есть положительная обратная связь по нейтронам. Это обусловлено, тем, что сечение и скорость реакций нейтронов с ³He (σ_{n^3He} и $\langle \sigma v \rangle_{n^3He}$) выше, чем у остальных термоядерных реакций во всем диапазоне температур. В реакции рождаются быстрые ионы T, взаимодействующие с D и ³He топливного состава с высоким энерговыделением, нагревом плазмы и рождением нейтронов. Нейтроны, вышедшие из плазмы, возвращаются в нее благодаря использованию замедляющей-фокусирующей структуры (ЗФС) как устройства термализации и формирования направленного потока нейтронов, которое увеличивает эффективность их возврата. Замедление нейтронов увеличивает плотность в потоке возвращаемых в плазму тепловых нейтронов (уменьшая их скорость). В термоядерных реакторах, работающих на базе дейтерий-тритиевой топливной смеси, сечение реакции (DT)-синтеза большое, но при этом основная энергия не остается в плазме, а уходит с быстрыми нейтронами: В ³He-D процессе продукты реакций заряженные, и энергия остается в плазме. Это ведет к тому, что в пределе мощность энерговыделения в плазме может достигать единиц кВт/см³, и реактор может быть относительно компактен. Для того чтобы некоторая система была устойчива и в ней существовал стационарный процесс, необходимо, чтобы энерговыделение было равно энергопотерям и при этом не превышало некоторого критического для системы значения. Что возможно в открытом энергетически саморазогреваемом за счет реакции n-³He в плазме реактора. Моделирование позволило заключить, что реактор термоядерного синтеза с внутренним каталитическим циклом и (n-³He-D-T) прогревом плазмы физически реализуем и сравнительно компактен.

Список литературы

1. Головин И.Н., Малорадиоактивный управляемый термоядерный синтез (реакторы с D³He), ИАЭ-4885/8. М, 1989.
2. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Устройство для формирования направленного потока нейтронов, Патент RU №1821818, 1990 г.
3. Дробышевский Ю.В., Столбов. С.Н. Способ управляемого термоядерного синтеза и управляемый термоядерный реактор для его осуществления. Патент RU № 2056649. – 1992 г.
4. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н., Корженевский А.В., Анфимов И.М., Кобелева С.П., Варлачев В.А., Некрасов С.А. / Разработка фокусирующего устройства управления нейтронами в ядерной энергетике./ Атомная энергия. 2021. Т. 131. № 6. С. 319-323.

А.Г. МОЗГОВОЙ

Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук (ФИАН) Москва, Россия

ЖИДКОСОЛЕВОЙ РЕАКТОР НА ПРИРОДНОМ УРАНЕ С ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Природный уран 238 делиться быстрыми нейтронами (более 1 Мэв), возникающими при термоядерном синтезе с выделением еще 200 Мэв энергии, без цепной, самоподдерживаемой реакции. Самым перспективным источником нейтронов становятся коллайдеры компактных торов (КТ) или FRC-field Reversed Configuration – плазмоид с замкнутым токовым витком с нужным составом и массой (микрограммы) ускоряют внешними магнитными полями и сталкивают с другим, летящим на встречу. При одинаковых направлениях тока КТ притягиваются и кинетическая энергия идет на нагрев плазмы с осуществлением термоядерной реакции.

A.G. MOZGOVOY

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

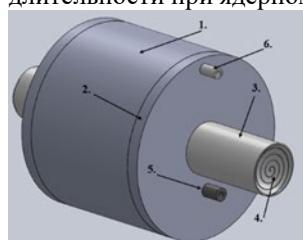
MOLTEN-SALT REACTOR ON NATURAL URANIUM WITH AN EXTERNAL SOURCE OF FAST NEUTRONS

Natural uranium 238 is divided by fast neutrons (more than 1 MeV) arising from fusion with the release of another 200 MeV of energy, without a chain, self-sustaining reaction. The most promising way now is compact torus (CT) colliders or FRC-field Reversed Configuration - a plasmoid with a closed current loop with the required composition and mass (micrograms) is accelerated by external magnetic fields and collides with another flying towards it. CT are attracted and all the kinetic energy goes to heating the plasma with the implementation of a thermonuclear reaction.

Работа обычных атомных реакторов основана на способности к цепной реакции при делении урана 235 медленными нейтронами, что иногда приводило к известным катастрофам. Природный уран 238 делиться быстрыми нейтронами (более 1 Мэв), возникающими при термоядерном синтезе с выделением еще 200 Мэв энергии, без цепной, самоподдерживаемой реакции. Для получения 10 МДж в одиночном импульсе от деления U 238 необходимо 100 кДж или $2.5 \cdot 10^{17}$ быстрых нейтронов (без учета вторичных нейтронов от деления, в термоядерной бомбе реальное усиление было в 5 раз). Сама термоядерная реакция имеет усиление порядка сотен -10 Кэв ядра дейтерия при слиянии дают от 2.45 Мэв. В США магнитное удержание больше не представляет собой наиболее перспективный путь к масштабной термоядерной энергии [1]. Самым перспективным направлением становится коллайдеры компактных торов (КТ) или FRC-field Reversed Configuration – плазмоид с замкнутым токовым витком с нужным составом и массой (микрограммы) ускоряют внешними магнитными полями и сталкивают с другим, летящим на встречу. При одинаковых направлениях тока КТ притягиваются и вся кинетическая энергия идет на нагрев плазмы с осуществлением термоядерной реакции.

Американские компании Helion Energy и Tri Alpha Energy привлекли около \$ 2 млрд., (из них 50 млн. от Роснано). Helion даже заключила контракты с Microsoft и крупнейшей сталелитейной компанией Америки Nucor на поставку реакторов 500 (!) МВт в 2028 г.

В ФИАН ведутся эксперименты, которые подтвердили возможность достижения «breakeven» на коллайдерах компактных торов: - два плазмоида, ускоренных навстречу друг друга, дали в месте столкновения температуру плазмы более 1 кэВ и длительность мягкого рентгеновского излучения около одной микросекунды, что аналогична такой длительности при ядерном взрыве.



1-корпус жидкосолевого реактора, 2- его крышки, 3 – коллайдер компактных торов, 4- индуктивный накопитель секции формирования компактных торов, 5-патрубки входа и выхода расплавленных солей урана 238, 6-водяная рубашка.

В таком реакторе топливо является и теплоносителем с $T= 500\text{-}700$ градусов. Это позволит использовать эти реакторы в космосе, где можно отводить тепло только через излучение. ($\sim T^4$)



Необходимо создание консорциума Роскосмоса, Ростеха, частных инвесторов и дружественных стран для реализации технологии и с перспективой последующей подачи совместной заявки в ВЭБ РФ или в Фонд Прямых Инвестиций. Аналогичная ассоциация создана в США. Компаниями, занятыми термоядерными исследованиями, привлечено более \$ 7 млрд. <https://www.fusionindustryassociation.org/>.

Список литературы

1. The Current U.S. Approach to Fusion, <https://scsp222.substack.com/p/the-current-us-approach-to-fusion>, SEP 19, 2024

С.В. КУЗНЕЦОВ

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЙ ТОКИ ИОННО-ЗВУКОВОГО СОЛИТОНА

В кинетическом подходе для описания движения электронной компоненты неизотермической плазмы показано, что в ионно-звуковом солитоне наряду с движением ионов и потоком захваченных электронов также существует ток пролетных электронов, который обратен по знаку к току захваченных электронов. Установлено, что во всем диапазоне скоростей ионно-звукового солитона эти токи сопоставимы по величине.

S.V. KUZNETSOV

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ELECTRONIC AND IONIC CURRENTS OF ION-ACOUSTIC SOLITON

In the kinetic approach to describe the motion of the electron component of non-isothermal plasma, it is shown that in the ion-acoustic soliton, along with the motion of ions and the flow of captured electrons, there is also a current of passing electrons, which is opposite in sign to the current of trapped electrons. It is established that in the entire range of velocities of the ion-acoustic soliton, these currents are comparable in magnitude.

Выполнено теоретическое исследование нелинейного движения неизотермической бесстолкновительной плазмы в виде ионно-звукового солитона в модели плазмы, в которой ионы описываются уравнениями холодной гидродинамики, а электронная компонента плазмы уравнением Власова с учетом скорости перемещения солитона. Определен диапазон допустимых скоростей солитона и зависимость амплитуды солитона от его скорости (рис. 1а). Показано, что учет движения солитона при определении функции распределения электронов по скоростям сдвигает нижнюю границу диапазона скоростей от скорости звука к большим значениям на величину поправки, квадратичной по отношению скорости солитона к характерной тепловой скорости электронов.

Впервые было обнаружено, что в лабораторной системе координат, наряду с ранее известным переносом захваченных электронов в направлении распространения солитона, существует поток пролетных электронов, направленный в противоположную сторону. Физическая причина появления тока пролетных электронов состоит в отсутствии симметрии по скоростям в функции распределения электронов, в результате чего электронов, нагоняющих солитон, меньше, чем электронов, которых нагоняет солитон. В итоге возникает интегральный поток электронов в направлении противоположном направлению движения солитона.

Показано, что во всем диапазоне скоростей, допустимых для ионно-звукового солитона, эти токи сопоставимы по величине (рис. 1б). При этом токи пролетных и захваченных электронов обеспечивают такое интегральное смещение отрицательного заряда через любое поперечное сечение плазмы, которое полностью компенсирует смещение положительного заряда ионов в плазме, так что плазма после прохождения солитона остается квазинейтральной. Учет тока пролетных электронов является необходимым для правильной интерпретации экспериментальных данных, получаемых при исследовании электронных токов, протекающих в области ионно-звуковых солитонов, например, при обработке измерений, производимых спутниками в космической плазме.

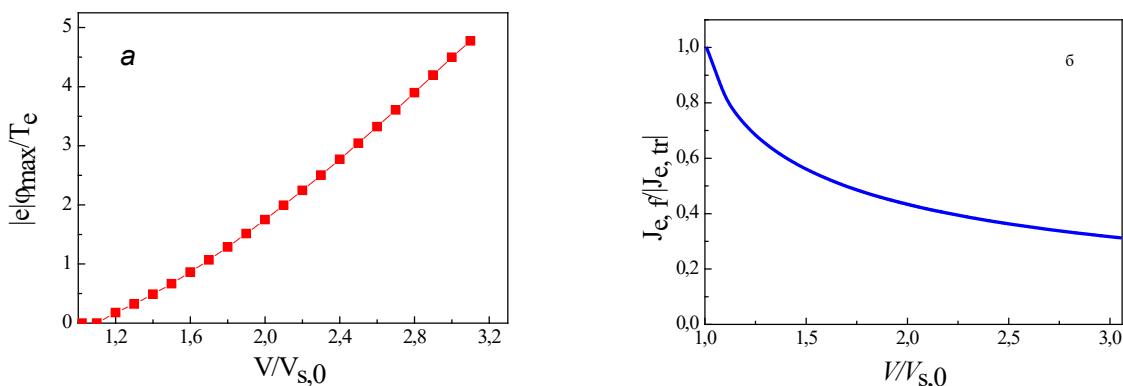


Рис. 1. Значение максимума потенциала ионно-звукового солитона в зависимости от его скорости V , нормированной на скорость ионного звука $V_{s,0}$ (а); отношение тока пролетных электронов $J_{e,f}$ к току захваченных электронов $|J_{e,tr}|$ в зависимости от скорости солитона V (б)

Список литературы

1. Кузнецов С.В. // Вестник ОИВТ РАН/ 2024 Т.13. С. 4-8.
2. Кузнецов С.В. // Теплофизика высоких температур. 2025. Т. 63. №1. (в печати).

Р. А. ЯХИН, С. Ю. ГУСЬКОВ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский пр., 53, 119991

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМЕ МАЛОПЛОТНОГО ПОРИСТОГО ВЕЩЕСТВА

Исследована эволюция свойств плазмы, образованной при нагреве импульсом лазерного излучения мишени из малоплотного пористого вещества. Рассмотрены возможности практического применения подобных мишеней.

Получено аналитическое решение для скорости нестационарной, плоской лазерно-индукционной волны ионизации в слое пористого вещества.

R.A. YAKHIN, S.YU. GUS'KOV
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, E-mail:yakhin.rafael@gmail.com

FEATURES OF ENERGY TRANSFER IN A PLASMA OF A LOW-DENSITY POROUS SUBSTANCE

The properties of plasma formed by heating a target made of a low-density porous substance with a laser pulse has been studied. The possibilities of practical application of such targets are considered.

An analytical solution has been obtained for the velocity of nonstationary planar laser-supported ionization wave in a layer of porous matter.

Применение малоплотного пористого вещества представляет собой перспективный способ управления процессами лазер-плазменного взаимодействия в ряде важных задач физики высоких плотностей энергии, таких как лазерный термоядерный синтез (ЛТС), исследование уравнения состояния вещества (УРС), развитие методов генерации и распространения в плазме высоко-энергетичных заряженных частиц. В первую очередь речь идёт о мелко-пористом веществе с плотностью близкой к критической плотности плазмы, соответствующей длинам волн коротковолнового лазерного излучения.

В работе получено аналитическое решение для скорости нестационарной, плоской лазерно-индукционной волны ионизации в слое пористого вещества лёгких химических элементов докритической плотности. Решение показывает степень запаздывания волны ионизации в слое пористого вещества по сравнению с эквивалентным слоем сплошного вещества, как функцию интенсивности и длины волны лазерного импульса, толщины слоя, средней плотности и размера пор вещества слоя. В аналитической форме установлены поправки к одномерному решению, учитывающие потери энергии на поперечное движение вещества, в условиях экспериментов по воздействию на плоскую мишень лазерного пучка с заданным радиусом. С учётом поправок на двумерный характер волны ионизации решение находится в количественном согласии с результатами измерения скорости лазерно-индукционной волны ионизации в слое пористого вещества различных экспериментов [1].

Установлены параметры лазерного пучка (энергия и длительность импульса, радиус пучка), обеспечивающего генерацию плоской волны ионизации в слое пористого вещества докритической плотности в диапазонах интенсивности лазерного импульса $10^{14} - 10^{15}$ Вт/см² и длины волны 0.35 – 0.53 мкм, которые отвечают интересам практических приложений в области исследования УРС [1, 2].

На основании расчёто-теоретических исследований показана возможность значительного повышения коэффициента усиления мишени ЛТС, содержащей внешний слой микроразмерного высокопористого вещества с плотностью близкой к критической плотности плазмы, по сравнению с мишенью традиционного типа с моноаблятором твёрдотельной плотности [3].

На основании двумерных численных расчётов взаимодействия острофокусированного лазерного пучка тераваттной мощности с радиусом менее 10 мкм с частично-гомогенизированной плазмой микроразмерного пористого вещества обосновано создание плазменного слоя с параметрами, отвечающими высокой эффективности ускорения высокоэнергетичных электронов и ионов под действием релятивистского лазерного импульса [4].

Список литературы

1. S. Yu Gus'kov, R. A. Yakhin; Nonstationary laser-supported ionization wave in layer of porous substance with subcritical density. Matter Radiat. Extremes 1 January 2024; 9 (1): 016601.
2. И. А. Белов и др., Генерация плоской стационарной ударной волны при предельно высокой передаче давления твердому веществу от малоплотного поглотителя излучения тераваттного лазерного импульса. ЖЭТФ, 2024, том 165, вып. 4, стр. 581 – 588.
3. Demchenko N. N. et al. Direct-drive ICF target with compound ablator containing a low-density component //Physics of Plasmas. – 2024. – Т. 31. – №. 11.
4. Gyrdymov M. et al. High-brightness betatron emission from the interaction of a sub picosecond laser pulse with pre-ionized low-density polymer foam for ICF research //Scientific Reports. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 14785.

М.А. АЛХИМОВА¹, И.Ю. СКОБЕЛЕВ¹, С.Н. РЯЗАНЦЕВ¹, Т.А. ПИКУЗ²

1. Объединенный институт высоких температур Российской академии наук Москва, Россия

2. Institute for Open and Transdisciplinary Research Initiatives, Osaka University, Suita, Japan

ДИАГНОСТИКА ВЕЩЕСТВА С ПЛОТНОСТЬЮ ЭНЕРГИИ ~ 1 ГДж/см³, ФОРМИРУЕМОГО ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАРЕЛИАТИВИСТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В работе представлены результаты по применению рентгеноспектральной диагностики для исследования плазмы стальных фольг (атомный номер $Z = 26$), формируемой под действием фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью $\geq 5 \cdot 10^{21} \text{ Вт/см}^2$. Эксперимент был проведен на Ti:Sa лазерном комплексе суб-ПВт мощности и направлен на исследования эмиссионных свойств плазмы, при взаимодействии тонких стальных фольг с высококонтрастными лазерными импульсами. Для измерения параметров плазмы использовались рентгеновские фокусирующие спектрометры (ФСПР) на основе сферически-изогнутых кристаллов альфа-кварца. На основе сравнения экспериментальных спектров с результатами атомно-кинетических расчетов спектров многозарядных ионов железа исследовано влияние энергии лазерного импульса, лазерного контраста на температуру, плотность, ионизационный состав стальной плазмы. При комплексном анализе рентгеновских эмиссионных спектров, измеренных в эксперименте с высоким лазерным контрастом, обнаружен эффект релятивистского просветления лазерной плазмы. Продемонстрирована возможность формирования в области взаимодействия плазмы с плотностью энергии ~ 1 ГДж/см³.

M.A. ALKIMOVA¹, I.Yu. SKOBELEV¹, S.N. RYAZANTSEV¹ T.A. PIKUZ²

1. Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Russia

2. Institute for Open and Transdisciplinary Research Initiatives, Osaka University, Suita, Osaka, Japan

DIAGNOSTICS OF MATTER STATE WITH ENERGY DENSITY ~ 1 GJ/cm³ GENERATED BY ULTRARELATIVISTIC LASER PULSES

The paper presents the results of X-ray spectroscopy diagnostics for the investigation of steel foil plasma (atomic number $Z = 26$) formed by femtosecond laser pulses with an intensity $\geq 5 \cdot 10^{21} \text{ W/cm}^2$. The experiment was performed on a sub-PW Ti:Sa laser facility and aimed to investigate the emission properties of the plasma during the interaction of thin steel foils with high-contrast laser pulses. Spherically bent alpha quartz crystals-based X-ray spectrometers with spatial resolution (FSSR) were used to measure the plasma parameters. The effects of laser pulse energy and laser contrast on the temperature, density and ionization composition of the steel plasma were investigated by comparing the experimental spectra with the results of atomic-kinetic calculations of the spectra of multiply charged iron ions. A comprehensive analysis of the X-ray emission spectra measured in the experiment with high laser contrast showed the effect of relativistic clearing of the laser plasma. The possibility of the formation of a plasma with an energy density of ~ 1 GJ/cm³ in the interaction region was demonstrated.

Создание вещества с высокой концентрацией энергии в лабораторных условиях всегда является интересной задачей для исследователей, поскольку соответствует естественному желанию достичь больших, рекордных параметров, реализовать возможность получения экзотических состояний в лабораторных условиях, изучить состояние вещества, из которого возникла наша вселенная и в котором находится порядка 95% видимого вещества в природе [1]. Такое состояние вещества встречается в плазме нейтронных звезд, пульсаров в ядрах планет и т.д. Например, в центре Юпитера давление достигает 40-60 Мбар, а в центре Солнца порядка 240 Гбар. В качестве драйвера, способного создать такое состояние вещества в лабораторных условиях могут быть, например, использованы фемтосекундные лазерные импульсы суб-ПВт интенсивности, которые при взаимодействии с твердотельной мишенью способны создать высокотемпературную плазму твердотельной плотности.

В работе показано, что в области взаимодействия высококонтрастного фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью $\geq 5 \cdot 10^{21} \text{ Вт/см}^2$, формируется плазма с плотностью энергии ~ 1.2 ГДж/см³, соответствующей давлению в 12 Гбар [2]. Представлены результаты по применению рентгеноспектральной диагностики для исследования плазмы стальных фольг (атомный номер $Z = 26$), формируемой под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Для измерения параметров плазмы использовались рентгеновские фокусирующие спектрометры (ФСПР) на основе сферически-изогнутых кристаллов альфа-кварца. На основе сравнения экспериментальных спектров с результатами атомно-кинетических расчетов спектров многозарядных ионов железа исследовано влияние энергии лазерного импульса, лазерного контраста на температуру, плотность, ионизационный состав стальной плазмы.

Список литературы

1. V.E. Fortov, Extreme States of Matter High Energy Density Physics, Springer Series in Materials Science, 2016.
2. Alkhimova M.A., Skobelev I.Yu., Pikuz T.A. and others // Matter Radiat. Extremes. 2024. Vol. 9, 067205.

М.В. СЕДОВ, С.Н. РЯЗАНЦЕВ, И.Ю. СКОБЕЛЕВ

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АРГОНОВСКИХ МИКРОСТРУКТУР ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ МОЩНЫМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

Методом частица-в-ячейке (PIC) проведена серия расчетов взаимодействия лазерного импульса с интенсивностью 10^{19} - 10^{22} Вт/см² с аргоновыми кластерами и микронитями диаметром 0.5-1 мкм. С помощью построенной аналитической модели получены временные зависимости свечения подобных микроструктур в наиболее интенсивные линии в рентгеновском диапазоне: Ly_a и He_a.

M.V. SEDOV, S.N. RYAZANTSEV, I.YU. SKOBELEV

Joint Institut for High Temperatore of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MODELLING THE X-RAY RADIATION OF ARGON MICROSTRUCTURES DURING IRRADIATION WITH A POWERFUL FEMTOSECOND LASER PUMP

A series of calculations of the interaction of a laser pulse with an intensity of 10^{19} - 10^{22} W/cm² with Ar clusters and microfilaments with a diameter of 0.5-1 μm were performed using the particle-in-cell (PIC) method. The constructed analytical model was used to determine the time dependencies of the X-ray yield of such microstructures in the most intense lines in the X-ray range (Ly_a and He_a).

Кластерные мишени представляют большой интерес как источник высокоэнергетичных заряженных частиц, а также как яркий точечный импульсный источник рентгеновского излучения [1-2]. Данный тип мишеней сочетает в себе практические преимущества газовой струи (не загрязняют вакуумную камеру и являются непрерывно обновляемыми), с высоким поглощением, соответствующим твердотельной мишени. Это позволяет использовать для создания плазмы лазеры с высокой частотой повторения импульсов (> 1 кГц). Расчеты взаимодействия коротких лазерных импульсов с кластерами обычно проводятся с помощью PIC-кодов (частица-в-ячейке), которые сами по себе являются весьма ресурсоемкими, и сочетание которых с кодами детальной радиационно-столкновительной кинетики требует использования вычислительных мощностей, недоступных большинству исследователей. Поэтому, как правило, моделирование лазерно-кластерной плазмы не включает в себя расчет излучаемых ею спектров.

В связи с этим в настоящей работе предлагается для оценки свечения плазмы в некоторых спектральных линиях малоэлектронных ионов использовать в PIC-расчетах простые аналитические модели. Конкретные результаты получены для плазмы аргоновых кластеров, очень часто использующихся в экспериментах с мощными фемтосекундными лазерными импульсами релятивистских интенсивностей.

Для моделирования эволюции лазерно-кластерной аргоновой плазмы использовался программный пакет EPOCH [3]. Применяемый PIC-код учитывает как полевую, так и столкновительную ионизацию. Также в моделировании можно включить расчет тормозного излучения. С помощью построенной аналитической модели был проведен анализ параметров лазер-плазменного источника рентгеновского излучения (длительности свечения и полное число испущенных фотонов) в зависимости от лазерной интенсивности и размера кластера, также рассмотрена замена кластера на микронить из конденсированного аргона.

Подобные мишени околотвердотельной плотности потенциально привлекательны для создания сверхбыстрых источников рентгеновского излучения из-за своей высокой яркости и короткой длительности, вызванной быстрым разлетом мишени. С помощью предложенной аналитической модели, используемой в сочетании с PIC-расчетами, можно провести оптимизацию параметров подобного источника – получить минимальную длительность рентгеновского импульса, или максимальный коэффициент конверсии лазерной энергии в излучении выбранных линий. Второе практическое применение представленной модели – диагностика лазерной интенсивности в экспериментах с кластерными мишенями. Используя расчетную зависимость отношения интенсивностей линий Ly_a и He_a от лазерной интенсивности и размера кластера, при знании размера кластера, можно решить обратную задачу, и по отношению интенсивностей резонансных линий оценить лазерную интенсивность. Или, наоборот, зная лазерную интенсивность в фокальном пятне, можно оценить размер кластера, попавшего в фокальную перетяжку в конкретном выстреле.

Список литературы

- Chen L.M. et. al. Bright betatron X-ray radiation from a laser-driven-clustering gas target // Scientific Reports. 2013. № 1(3). C. 1912.
- Dorchies F. et. al. Observation of Subpicosecond X-Ray Emission from Laser-Cluster Interaction // Physical Review Letters. 2008. № 20(100). C. 205002.
- Arber T.D. et. al. Contemporary particle-in-cell approach to laser-plasma modelling // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2015. № 11(57). C. 113001.

С. Н. РЯЗАНЦЕВ, И. Ю. СКОБЕЛЕВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва

РОЛЬ ПОЛЕВОЙ ИОНИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА РЕЛЯТИВИСТКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ С ВЕЩЕСТВОМ С ВЫСОКИМ ЗАРЯДОМ АТОМНОГО ЯДРА

Рассмотрены теоретические аспекты методики разделения вкладов полевой и столкновительной ионизации в ионизационное состояние плазмы, образующейся в веществе с высоким зарядом атомного ядра Z под действием лазерного импульса релятивистской интенсивности.

S.N. RYAZANTSEV, I. YU. SKOBELEV

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow

ROLE OF THE OPTICAL FIELD IONIZATION IN THE INTERACTION OF A RELATIVISTIC LASER PULSE WITH MATTER WITH A HIGH CHARGE OF THE ATOMIC NUCLEUS

The theoretical aspects of the method for separating the contributions of field and collisional ionization to the ionization state of the plasma formed in matter with a high charge of the atomic nucleus Z irradiated by a laser pulse of relativistic intensity are considered.

Одним из важнейших параметров лазерно-плазменного эксперимента является актуальная интенсивность лазерного излучения на мишени. В связи с этим к настоящему моменту была разработана и экспериментально апробирована целая совокупность различных *in situ* методов ее измерения. Их краткий обзор можно найти, например, во Введении к [1]. Важно отметить, что выбор диагностического подхода зависит от диапазона интенсивности. Методы, разработанные для долятевистских значений ($<10^{18}$ Вт/см 2), дают довольно точные результаты. Проблема возникает для случая гораздо более высоких ($>10^{21}$ Вт/см 2) интенсивностей. Для данного диапазона наиболее перспективным является способ, основанный на анализе представленности в образующейся лазерной плазме ионов определенной кратности. В первую очередь речь идет о Н-подобных ионах с высоким Z . Они могут образовываться в плазме как за счет столкновительной ионизации, так и за счет ионизации полем лазерной волны (далее *OFI* от англ. *Optical Field Ionization*). Для данного иона с зарядом Q можно рассчитать значение интенсивности $I_{\text{порог}}$ (например, в рамках теории Аммосова-Делоне-Крайнова [2]), необходимое для удаления электрона из иона за счет *OFI*. Если при этом доказано, что в рассматриваемых условиях столкновительная ионизация иона Q не может эффективно реализовываться, то наблюдение в области взаимодействия ионов с зарядом $Q+1$ можно рассматривать как свидетельство того, что $I_{\text{порог}}$ было достигнуто.

С практической точки зрения такой подход подразумевает использование в качестве лазерной мишени газовых сред низкой плотности (концентрация атомов $n_0 \sim 10^{12} - 10^{14}$ см $^{-3}$), чтобы минимизировать как межчастичные столкновения, так и возможные нелинейные эффекты. Сама диагностика выполняется путем регистрации многозарядных ионов, образующихся в области перетяжки пучка. Потенциальной проблемой этого метода является очень малое количество частиц, которые необходимо детектировать. Даже если эта проблема решена, диагностические результаты, полученные таким образом, все еще являются косвенными с точки зрения любого другого эксперимента с использованием того же лазерного оборудования, поскольку измерение выполняется не для фактической мишени, а для тестовой.

В рамках доклада будет рассмотрена методика *in situ* диагностики интенсивности фемтосекундных лазерных импульсов. Она основана на результатах нестационарных расчетов кинетики гидродинамически разлетающейся фемтосекундной лазерной плазмы ионов с $Z \sim 20 - 30$. Они показывают, что в такой плазме не может образоваться значительное (десятка процентов) количество Н-подобных ионов только за счет столкновительной ионизации. Таким образом, наблюдение в экспериментальном спектре рентгеновского излучения плазмы интенсивных спектральных линий, соответствующих переходам в таких ионах, может рассматриваться как свидетельство их эффективной генерации за счет *OFI*, а значит и достижения необходимого для этого $I_{\text{порог}}$.

Список литературы:

1. Ciappina M.F., Peganov E.E., Popruzhenko S. V. Focal-shape effects on the efficiency of the tunnel-ionization probe for extreme laser intensities // Matter and Radiation at Extremes. American Institute of Physics Inc., 2020. Vol. 5, № 4.
2. Ammosov M. V., Delone N.B., Krainov V.P. Tunnel Ionization Of Complex Atoms And Atomic Ions In Electromagnetic Field / ed. Alcock J.A. 1986. P. 138.

Н.Е. АНДРЕЕВ^{1,2}, В.С. ПОПОВ¹, И.Р. УМАРОВ^{1,2}, О.Н. РОЗМЕЙ³

1 Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

2 Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет), Долгопрудный, Московская область, Россия

3 Гёте Университет, Франкфурт, Германия

ЧАСТИЦЫ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРА С ВЕЩЕСТВОМ

Для проводимых и планируемых экспериментов получены и проанализированы зависимости параметров лазерно-ускоренных электронов от интенсивности лазерного излучения и плотности плазменной мишени как для суб-пикосекундных, так и фемтосекундных лазерных импульсов.

N. E. ANDREEV^{1,2}, V.S. POPOV¹, I.R. UMAROV^{1,2}, O.N. ROSMEJ³

1 Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

2 Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi, Moscow region, Russia

3 Goethe University, Frankfurt, Germany

HIGH ENERGY PARTICLES IN RELATIVISTIC LASER-MATTER INTERACTION

The dependences of the parameters of laser-generated electron bunches on the laser radiation intensity and plasma density for subpicosecond and femtosecond laser pulses are obtained and analyzed taking into account current and future experiments.

Рассмотрены различные процессы лазерного ускорения электронов, начиная с кильватерного ускорения в режиме самомодуляции лазерного импульса [1]. Обсуждается более эффективная концепция создания вторичных источников излучения и высокозергетических частиц на основе генерации релятивистских электронов в режиме прямого лазерного ускорения в протяженной плазме околоскритической плотности [2, 3], которая была подтверждена в экспериментах [4], см. Рис. 1.

Зависимости параметров лазерно-ускоренных электронов от интенсивности лазерного излучения и плотности плазменной мишени как для суб-пикосекундных, так и фемтосекундных лазерных импульсов получены и проанализированы для проводимых и планируемых экспериментов [4, 5].

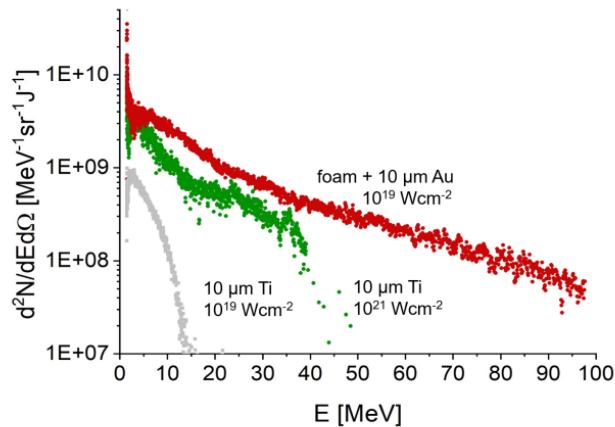


Рис. 1. Спектры лазерно-ускоренных электронов, нормированные на энергию лазерного импульса в фокальном пятне для различных мишеней, облучаемых лазерными импульсами с интенсивностью $1.5 \times 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$, $9 \times 10^{20} \text{ Wcm}^{-2}$ и $1.6 \times 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$.

Полученные результаты указывают направление для повышения эффективности вторичных источников электронов, позитронов, и гамма-квантов тормозного излучения, а также источников протонов и нейтронов для различных приложений.

Список литературы

1. N.E. Andreev, L.M. Gorbunov, Physics–Uspekhi. 42 (1), 49–77 (1999).
2. L.P. Pugachev, N.E. Andreev, P.R. Levashov, O.N. Rosmej, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, V. 829. P. 88–93 (2016).
3. N.E. Andreev, V.S. Popov, O.N. Rosmej, et al. Quantum Electronics, 51, 1019–1025 (2021).
4. O.N. Rosmej, N.E. Andreev, S. Zahter, et al., New J. Phys. V. 21, P. 043044 (2019).
5. Andreev N.E., Umarov I.R., Popov V S. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2023, Vol. 50, Suppl. 7, pp. S797–S805..

Р.К. КУЛИКОВ^{1,2}, С.С. МАКАРОВ^{1,3}, И.Ю. СКОБЕЛЕВ^{1,2}

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

³*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрена возможность диагностики лазерной плазмы с внешней фотонакачкой одним из уже классических способов, а именно, по относительным интенсивностям резонансной и интеркомбинационной линий многозарядных Не-подобных ионов [1]. На основе детальных кинетических расчетов определены условия, при которых эта методика может применяться к рассматриваемой плазме без каких-либо модификаций, и рассчитаны относительные интенсивности данных линий для случаев, когда внешнее воздействие существенно меняет кинетику их возбуждения.

R.K. KULIKOV^{1,2}, S.S. MAKAROV^{1,3}, I.YU. SKOBELEV³

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

²*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia*

X-RAY SPECTRAL DIAGNOSTICS OF LASER PLASMA UNDER THE INFLUENCE OF POWERFUL SHORT-WAVE RADIATION

The possibility of diagnostics of laser plasma with external pumping by one of the classical methods is considered, namely, by the relative intensities of the resonance and intercombination lines of multiply charged He-like ions [1]. Based on detailed kinetic calculations, the conditions under which this method can be applied to the plasma under consideration without any modifications are determined, relative intensities of these lines are calculated for cases where external radiation significantly changes the kinetics of their excitation.

В последние годы появился и стал очень актуальным новый лабораторный плазменный объект, в котором большую роль могут играть процессы, которые не были важны в исследованной ранее плазме. Речь идет о лазерной плазме, которая подвергается воздействию мощного внешнего коротковолнового излучения. Интенсивность этого внешнего излучения может на порядки превышать интенсивность излучения, генерируемого в самой плазме, что должно настолько увеличить вероятности соответствующих процессов фотовозбуждения и фотоионизации, что именно они начнут играть определяющую роль в кинетике плазмы. Такими новыми плазменными объектами являются, например, лазерная плазма, образующаяся при косвенном нагреве мишени типа хольраум, или лазерная плазма, подвергающаяся воздействию излучения мощных рентгеновских лазеров на свободных электронах (РЛСЭ). Следует подчеркнуть, что уже сегодня РЛСЭ позволяют достигать интенсивности воздействия рентгеновского излучения на вещество в диапазоне 10^{18} - 10^{22} Вт/см².

Показано, что фотонакачка может сильно изменить характер кинетики возбуждения рентгеновских спектров многозарядных ионов. Ее роль заключается как в изменении времен жизни возбужденных состояний за счет появления канала безызлучательного их распада, так и в изменении ионизационного состояния плазмы. В зависимости от химического состава, плотности и температуры плазмы, с одной стороны, и интенсивности спектра фотонакачки, с другой, возможно проявление только одного из перечисленных эффектов, или сразу обоих.

На примере метода определения плотности по отношению интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий Не-подобного иона аргона показано, что если энергии фотона накачки недостаточно для прямой фотоионизации основного состояния, то начиная с интенсивностей порядка 10^{15} Вт/см² диагностику надо проводить с учетом фотонакачки. Если падающие фотонны достаточно энергетичны для фотоионизации состояния $1s^2$, то необходимость модификации будет зависеть от плотности плазмы, и при $N_e \sim 10^{21}$ см⁻³ потребуется уже для интенсивностей больших 10^{12} Вт/см².

Список литературы

1. Gabriel A.H., Jordan C. // Case Studies in Atomic Collision Physics. 1972. Vol. 2. P. 209.

М. П. ФИЛИМОНЧУК^{1,2}, К. А. ИВАНОВ^{1,3}, С. А. ШУЛЯПОВ¹, Д. А. ГОРЛОВА^{4,1},
И. Н. ЦЫМБАЛОВ^{4,1}, И. П. ЦЫГВИНЦЕВ⁵, Р. В. ВОЛКОВ¹, А. Б. САВЕЛЬЕВ^{1,3}

¹Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия;

³Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия;

⁴Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия;

⁵Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОСЛОЙНЫХ ЖИДКОСТНЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Рассмотрена возможность применения нового типа мишеней для лазерно-плазменной генерации электронов с высоким зарядом с применением двух лазерных импульсов. Проведены измерения заряда и энергии полученного электронного пучка, оценена его пространственная стабильность и расходимость.

M. P. FILIMONCHUK^{1,2}, K. A. IVANOV^{1,3}, S. A. SHULYAPOV¹, D. A. GORLOVA^{4,1},
I. N. TSYMBALOV^{4,1}, I. P. TSYGVINTSEV⁵, R. V. VOLKOV¹, A. B. SAVEL'EV^{1,3}

¹Physics faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

³Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

⁴Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

⁵Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

STUDY OF THIN-LAYER LIQUID TARGETS FOR LASER-PLASMA SOURCES OF ACCELERATED ELECTRONS

The possibility of using a new type of targets for laser-plasma generation of high-charge electrons using two laser pulses is considered. The charge and energy of the resulting electron beam were measured, and its spatial stability and divergence were estimated.

Современные компактные лазеры, способные генерировать фемтосекундные импульсы с пиковой мощностью при частотах до нескольких килогерц, предоставляют возможность ускорения частиц в лабораторных условиях. Это открывает перспективы их широкого применения для генерации источников электронов, рентгеновских лучей, нейтронов и позитронов, востребованных в прикладных и фундаментальных исследованиях.

В данной работе исследуются перспективы использования нового типа мишеней для создания коллимированных пучков высокоэнергетических электронов с использованием фемтосекундного лазера мощностью 1–2 ТВт, взаимодействующего с докритической плазмой. Процесс ускорения основан на многоступенчатом наборе энергии, включающем формирование и разрушение плазменных волн, прямое лазерное ускорение и ускорение частиц в лазерной ускоряющей волне (Laser Wakefield Acceleration), что ранее было продемонстрировано как численно, так и экспериментально [1,2].

Новые мишени представляют собой тонкие листы жидкого этанола, которые пробиваются интенсивным (до 10^{13} Вт/см²) наносекундным предварительным импульсом, формируя плазму с плотностью на уровне 0,1 критического значения. Для получения плоских жидкых листов использованы методы механической модуляции и специально разработанные сопла, обеспечивающие формирование необходимой геометрии струи. Такой подход позволяет создавать мишени с высокой пространственной стабильностью (менее 1 микрона) и регулируемой толщиной от 0,1 до 10 микрон. Однако повышенный расход жидкости требует эффективной организации её сбора для работы в условиях высокого вакуума.

Эксперименты показали, что при использовании таких мишеней возможно создание электронных пучков с энергией более нескольких МэВ и конверсией порядка нКл/Дж. Оценка скорости абляции при воздействии наносекундного импульса показала, что испаряемый объём не превышает 10^{-6} мл. При этом пары этанола не создают загрязнений на оптических элементах, что устраняет необходимость их защиты и способствует более эффективной передаче энергии лазера к мишени. Текущая конструкция мишени рассчитана на работу с частотой повторения до 1 кГц. При использовании специальных сопел генерация электронного пучка характеризуется высокой стабильностью и повторяемостью от выстрела к выстрелу. Устойчивость направления пучка сохраняется на уровне менее 0,1 рад, а расходимость в единичном выстреле составляет менее 0,05 рад.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-79-10207.

Список литературы

1. K.A. Ivanov et al., Phys. Rev. Accel. Beams (27), 051301 (2024).
2. K A Ivanov et al 2024 *Laser Phys. Lett.* **21** 075402 (2024)

А.К. КУТУКОВ, С.Е. ПАНИН, А.А. СЕРГЕЕЧЕВ, М.А. МИЛЛЕР, Г.А. ЗЕМЦОВ М.В. ПЕТРАКОВ
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 40Х13 И 30ХГСА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

Рассмотрены результаты обработки спецсталий 30ХГСА и 40Х13 импульсными потоками плазмы при различных значениях тепловой нагрузки. Измерены микротвердость и шероховатость образцов. Проведены трибологические испытания, в ходе которых оценены коэффициенты трения и скорости износа. Определены режимы обработки, при которых наблюдается максимальное уменьшение скорости износа до 4,9 раз. Улучшение трибологических характеристик объясняется уменьшением шероховатости совместно с увеличением микротвердости поверхности спецсталий.

A.K. KUTUKOV, S.E. PANIN, A.A. SERGEECHEV, M.A. MILLER, G.A. ZEMTSOV, M.V. PETRAKOV
JSC «SRC RF TRINITI», Moscow, Troitsk, Russia

CHANGES IN WEAR RESISTANCE OF STEELS AFTER TREATMENT WITH PULSED PLASMA FLOWS

The results of processing of special steels 30KhGSA and 40X13 by pulsed plasma flows at different values of thermal load are considered. Microhardness and roughness of samples are measured. Tribological tests have been carried out, during which friction coefficients and wear rates have been estimated. The treatment modes at which the maximum reduction of wear rate up to 4.9 times is observed were determined. The improvement of tribological characteristics is explained by the reduction of roughness together with the increase of microhardness of the surface of special steels.

Повышение износостойкости материалов является важной задачей современной промышленности, поскольку данная эксплуатационное свойство определяет производительность, надежность и срок службы изделий. Износ, возникающий в результате взаимодействия поверхностей во время механического движения, может привести к деградации материала, увеличению расходов на техническое обслуживание, потерям энергии и простоям в работе. Перспективным способом обработки является сверхбыстрая закалка импульсными потоками плазмы (ИПП). Обработка материалов ИПП позволяет существенно улучшить эксплуатационные свойства материалов, включая износостойкость [1].

Для обработки ИПП были выбраны стали 30ХГСА и 40Х13, часто используемые в машиностроении. Обработка проводилась на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе («КСПУ-Б») [2]. В качестве плазмообразующего газа использовался гелий. Тепловая нагрузка, поглощаемая материалом, варьировалась в диапазоне от 30 до 80 Дж/см² при длительности импульса в 1 мс, что соответствовало температурам нагрева до и выше плавления сталей. Измерение микротвердости производилось методом Виккерса с нагрузкой индентора 50 г. Испытания на износостойкость проводились методом «штифт на диске» с использованием в качестве контртела шарика Al₂O₃ с нагрузкой 5 Н при длительности 1 час. Исследование поверхности материалов, включающее измерение шероховатости и размеров дорожки износа осуществлялось методом конфокальной микроскопии.

Ранее при обработке конструкционных сталей ИПП было установлено, что эффективная комбинация минимальной шероховатости и высокой микротвердости достигается при тепловых нагрузках близких к порогу плавления [3]. Аналогичная зависимость подтвердилась и в случае рассмотренных спецсталий – в указанных режимах обработки отмечено увеличение микротвердости до 4,5 раз при уменьшении шероховатости на 10-15%. Дальнейшее увеличение тепловой нагрузки не приводило к росту микротвердости, в отличие от шероховатости, где изменение превышало 10 раз.

Известно, что износостойкость материала во многом зависит от состояния его поверхности. Так, коэффициент трения повторял зависимость шероховатости от тепловой нагрузки – наибольшее уменьшение значений на 10-25% установлено для режимов, при которых нагрев поверхности составляет величины порядка порога плавления. Соответствующее уменьшение скорости износа обработанных сталей составило 3,7-4,9 раз. При больших тепловых нагрузках наблюдалось катастрофическое увеличение скорости износа с ростом коэффициента трения с 0,4 до 0,6. Полученные результаты объясняются связью износостойкости с состоянием поверхности материалов, в частности изменением микротвердости и шероховатости.

Обработка ИПП позволяет воздействовать на износостойкость материалов. В зависимости от тепловой нагрузки продемонстрировано как улучшение, так и ухудшение износостойкости сталей 30ХГСА и 40Х13 после воздействия ИПП. Отсюда следует, что для эффективного упрочнения материалов ИПП требуется предварительный подбор режимов обработки.

Работа выполнена в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии»: государственный контракт № Н.4к.241.09.23.1058 от 17.04.2023.

Список литературы

1. В. А. Грибков и др. // М.: Круглый год. - 2001. - 527 с.
2. Кутуков А.К. и др. // Инж. физ. – 2023. – № 10. – С. 47-58.
3. Кутуков А.К. и др. // Упр. техн. и покр. 2024. Т. 20, № 7. С. 315—321.

А.К. ВОРОНА, А.Е. ЕВСИН, Н.А. ПУНТАКОВ, С.С. ДОВГАНЮК, Н.О. САВВИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИИ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ В АНОДНОМ РЕЖИМЕ

В работе проведено сравнительное исследование коррозии сплавов Zr-Nb и Zr-Nb-Sn-Fe при облучении в кислородсодержащей плазме в анодном режиме. Установлено, что соотношение скоростей коррозии сплавов зависит от потока электронов, приходящего на образец из плазмы. Сделаны предположения, объясняющие особенности плазменного оксидирования сплава, содержащего Sn и Fe.

A.K. VORONA, A.E. EVSIN, N.A. PUNTAKOV, S.S. DOVGANYUK, N.O. SAVVIN,
L.B. BEGRAMBEKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

FEATURES OF ZIRCONIUM ALLOYS CORROSION UNDER PLASMA IRRADIATION IN THE ANODIC MODE

A comparative study of the corrosion of Zr-Nb and Zr-Nb-Sn-Fe alloys under irradiation in oxygen-containing plasma in the anodic mode is presented. It has been established that the ratio of the corrosion rates of the alloys depends on the electron flux coming to the sample from the plasma. Assumptions have been made to explain the features of plasma oxidation of the alloy containing Sn and Fe.

Создание коррозионностойких циркониевых сплавов для оболочек твэлов современных легководных реакторов требует проведения дореакторных испытаний. Традиционные коррозионные испытания, заключающиеся в выдержке образцов в водных автоклавах, занимают многие месяцы, тормозя прогресс в разработке новых материалов. Применение плазменного облучения под плавающим потенциалом позволило существенно ускорить коррозию циркониевых сплавов. Вместе с тем, при повышении потенциала на образце можно добиться еще большей скорости его оксидирования в плазме за счет создания в растущем оксидном слое электрического поля, действующего на ионы кислорода в решетке оксида и обеспечивающего их дрейф в глубину. Для решения вопроса о применимости данного режима плазменного оксидирования для ускоренных коррозионных испытаний материалов оболочек твэлов требуется исследование корреляции его результатов с результатами автоклавных испытаний.

В данной работе образцы сплавов Zr-Nb и Zr-Nb-Sn-Fe облучались в Ar + O₂ плазме разряда с накальным катодом в анодном режиме при температуре 600°C в течение 5 ч. Плотность электронного тока на образцы варьировалась в различных экспериментах от 40 до 120 mA/cm². Для сравнения образцы выдерживались в кислороде атмосферного давления при тех же температурно-временных условиях. Соотношение коррозионных привесов двух сплавов и особенности структуры их поверхностных оксидных слоев при выдержке в кислороде качественно коррелировали с тем, что наблюдалось при их испытаниях в водном автоклаве (360°C, 186 atm).

Эксперименты показали, что характер оксидирования циркониевых сплавов в анодном режиме зависит от плотности электронного тока, приходящего из плазмы на образцы. При плотности тока 40 mA/cm² на поверхности сплава Zr-Nb-Sn-Fe образуется оксидный слой большей толщины, по сравнению со сплавом Zr-Nb, что согласуется с результатами испытаний в автоклаве. Однако, в отличие от Zr-Nb, структура оксида на поверхности сплава Zr-Nb-Sn-Fe меняется, по сравнению с выдержкой в кислороде. Внутренняя часть оксидного слоя, примыкающая к границе с металлом, оказывается сильно разрушена, а оксид в этой области нестехиометричен. Во внешней, стехиометрической части оксидного слоя наблюдаются параллельные поверхности трещины, характерные для оксида, полученного на данном сплаве при выдержке в кислороде. При повышении плотности тока до 60 mA/cm² соотношение толщин оксидных слоев двух сплавов по-прежнему качественно коррелирует с результатами автоклавных испытаний, но при этом нестехиометрическая часть оксида на поверхности сплава Zr-Nb-Sn-Fe существенно уменьшается, а на многих участках – полностью исчезает. Наконец, дальнейшее повышение плотности тока до 120 mA/cm² приводит к тому, что корреляция с эталонными результатами нарушается: толщина оксида на поверхности сплава Zr-Nb становится больше, по сравнению со сплавом Zr-Nb-Sn-Fe.

Для объяснения результатов было выдвинуто предположение, что характер роста оксида на поверхности сплава Zr-Nb-Sn-Fe определяется соотношением скорости поступления кислорода в приповерхностную область и скорости его транспорта сквозь оксидный слой. В процессе окисления сплава Zr-Nb-Sn-Fe железо и олово, входящие в его состав, выходят на границы формирующихся зерен оксида циркония, замедляя их дальнейшее доокисление. При интенсивном насыщении поверхности кислородом и медленном (диффузионном) его транспорте в глубину нестехиометрические зерна успевают доокислиться до ZrO₂. Когда скорость транспорта кислорода сквозь оксид возрастает за счет дрейфа в электрическом поле, то образуется оксидный слой большей толщины, но со значительной нестехиометрической частью. Когда дрейф ионов кислорода в электрическом поле начинает играть определяющую роль в транспорте кислорода, параллельные поверхности трещины в оксидном слое сплава Zr-Nb-Sn-Fe препятствуют росту оксида, что приводит к нарушению корреляции с результатами автоклавных испытаний.

А.К. РАЛЬНИКОВ, А.Е. ЕВСИН, Д.А. МЕЛЬНИКОВ, Н.О. САВВИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПОВЕДЕНИЕ ВОДОРОДА В ЦИРКОНИЕВОМ СПЛАВЕ Э110 ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СЛОЕВ В ПЛАЗМЕ И ПРИ ВЫДЕРЖКЕ ОБРАЗЦОВ С НАСЫЩЕННОЙ УГЛЕРОДОМ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ПЕРЕГРЕТОМ ПАРЕ

Проведено ТДС-исследование поведения водорода в сплаве Э110 при создании на его поверхности углеродсодержащих слоев в плазме и при выдержке образцов с насыщенной углеродом поверхностью в перегретом паре. Показано, что формирование углеродсодержащих слоев сопровождается возникновением поверхностных состояний, обеспечивающих низкотемпературную десорбцию водорода из циркония. При испытаниях в паре (633 К, 1 атм) в течение 500 ч данные состояния исчезают.

A.K. RALNIKOV, A.E. EVSIN, D.A. MELNIKOV, N.O. SAVVIN, L.B. BEGRAMBEKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

HYDROGEN BEHAVIOR IN ZIRCONIUM ALLOY E110 DURING FORMATION OF CARBON-CONTAINING LAYERS ON ITS SURFACE IN PLASMA AND DURING THE EXPOSURE OF SAMPLES WITH A CARBON-SATURATED SURFACE TO SUPERHEATED STEAM

A TDS study of hydrogen behavior in zirconium alloy E110 was conducted during the formation of carbon-containing layers on its surface and during the exposure of samples with a carbon-saturated surface to superheated steam. It was shown that the formation of carbon-containing layers is accompanied by the emergence of surface states that provide low-temperature thermal desorption of hydrogen from zirconium. During steam tests (633 K, 1 bar) for 500 h, these states disappear.

В процессе работы легководного реактора циркониевые оболочки твэлов поглощают водород в результате взаимодействия с теплоносителем. При накоплении большого количества водорода возникает угроза гидридного растрескивания оболочек. Известно, что поверхностные загрязнения могут способствовать наводороживанию материалов, а углерод среди возможных загрязнений поверхности оболочек твэлов является наиболее вероятным. В связи с этим представляется важным изучение влияния поверхностного углерода на поглощение водорода циркониевыми сплавами и выявление условий загрязнения, представляющих опасность для эксплуатации твэлов. В данной работе проведено ТДС-исследование закономерностей захвата и десорбции водорода при формировании углеродсодержащих слоев на поверхности сплава Э110 (Zr-1%Nb) в аргоновой плазме газового разряда с накальным катодом, а также при выдержке образцов с этими слоями в перегретом водяном паре.

Формирование углеродсодержащих слоев на поверхности образцов осуществлялось при температуре 620 К в следующих режимах: а) осаждение атомов углерода на образцы, находящиеся под плавающим потенциалом; б) осаждение атомов углерода с ассистированием потоком ионов аргона с энергией ≈ 100 эВ; в-г) со-осаждение атомов углерода и циркония в соотношениях 1/4 и 4/1. Все образцы с углеродсодержащими слоями испытывались в водяном паре при температуре 633 К и давлении 1 атм в течение 500 ч.

В результате экспериментов было установлено, что при формировании углеродсодержащих слоев возникают поверхностные состояния, которые обеспечивают выход водорода, содержащегося в образце, при температурах, значительно ниже характерных температур термодесорбции водорода из циркония, когда на его поверхности есть оксидный слой (≈ 1300 К) и когда оксидный слой отсутствует или поврежден (≈ 1050 К). В ТДС-спектрах водорода из образцов каждого типа наблюдается по несколько пиков из следующего ряда: 940 К; 830 К; 580 К; 480 К. Сделано предположение, что возникновение поверхностных состояний, обеспечивающих низкотемпературную десорбцию водорода из циркония, происходит вследствие образования на поверхности карбидов циркония. Наличие карбидной фазы было подтверждено РФЭС-измерениями.

В процессе формирования углеродсодержащих слоев на поверхности циркониевого сплава содержание в нем водорода может как увеличиваться, так и уменьшаться, в зависимости от условий эксперимента. При осаждении углерода на образец, находящийся под плавающим потенциалом, происходит захват водорода из молекул воды остаточного газа, и содержание водорода в образце увеличивается. При осаждении углерода с ионным ассистированием, а также при со-осаждении C и Zr с избытком углерода, возникают поверхностные состояния, обеспечивающие термодесорбцию водорода из циркония при температуре напыления. В результате, интенсивность выхода водорода превосходит интенсивность его захвата, и содержание водорода в образце уменьшается. При со-осаждении C и Zr с избытком циркония низкотемпературная десорбция водорода также происходит, однако, вследствие более интенсивного захвата, содержание водорода в образце возрастает.

При испытаниях образцов с углеродсодержащими поверхностными слоями в перегретом паре в течение 500 ч водород захватывается только в образец со смешанным слоем C/Zr=4/1. При этом в ТДС-спектрах водорода, полученных после испытаний всех образцов, низкотемпературные максимумы отсутствуют. По-видимому, поверхностные состояния, обеспечивающие низкотемпературный выход водорода из циркония, исчезают вследствие окисления карбидов на поверхности.

А.В. БЕРНАЦКИЙ¹, И.В. КОЧЕТОВ^{1,2}, В.В. ЛАГУНОВ¹, В.Н. ОЧКИН¹

¹ФГБУН ФИАН им П.Н. Лебедева, Москва, ²ГНЦ РФ Триини, Троицк, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ МОЛЕКУЛ ВОДЫ И КИСЛОРОДА В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ ПРИ УЧАСТИИ ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВОЙ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ

Исследовано поведение концентраций молекул воды и кислорода под действием тлеющего разряда постоянного тока в смесях с гелием в кварцевой разрядной трубке. Измерения концентраций проводились методом диодной лазерной спектроскопии поглощения, разработан новый спектрометр с внешним резонатором и двумя независимыми измерительными каналами, работающими одновременно, в областях спектра около 760 и 1390 нм. Создана кинетическая 0D модель, включающая более 250 реакций, протекающих в объеме и на стенке разрядной трубки. Нарушение баланса по водороду связано с протеканием реакций между частицами, наработанными в разряде и адсорбированными на стенке трубы на стадии ее заполнения.

A.V. BERNATSKIY¹, I.V. KOCHETOV^{1,2}, V.V. LAGUNOV¹, V.N. OCHKIN¹

¹Lebedev Physical Institute, Moscow, ²Trinity Research Center, Moscow

WATER AND OXYGEN MOLECULES TRANSFORMATIONS IN A GLOW DISCHARGE WITH THE PARTICIPATION OF A QUARTZ DISCHARGE TUBE SURFACE

The behavior of water and oxygen molecule concentrations under the action of a direct current glow discharge in mixtures with helium in a quartz discharge tube was studied. Concentration measurements were carried out using diode laser absorption spectroscopy; a new spectrometer with an external resonator and two independent measuring channels operating simultaneously in the spectral regions of about 760 and 1390 nm was developed. A kinetic 0D model was created, including more than 250 reactions occurring in the volume and on the wall of the discharge tube. The hydrogen imbalance was associated with reactions between particles produced in the discharge and adsorbed on the tube wall at the stage of its filling.

В данной работе методом диодной лазерной спектроскопии с внешним резонатором проводится одновременная диагностика поведения объемной плотности молекул воды и кислорода в плазме тлеющего разряда. Исследование этой пары молекул интересно тем, что они участвуют во многих реальных плазменных процессах и присутствуют в составе плазмообразующих газов и как продукты преобразований иных, содержащих атомы кислорода и водорода, молекул и как объекты взаимных превращений в условиях плазмы [1].

Измерения проводились с использованием нового спектрометра с двумя независимыми оптическими каналами. Спектрометр обеспечивал одновременные измерения поглощения в реальной плазме на уровне $\sim 10^{-7}$ см⁻¹, что для пары H₂O и O₂ соответствует чувствительности 10¹⁴ см⁻³ и 10¹⁵ см⁻³, соответственно. Спектральное разрешение составляло $\sim 10^{-4}$ см⁻¹. Аналитический кварцевый внешний резонатор спектрометра являлся одновременно разрядной трубкой, полная длина положительного столба составляла 54 см. В качестве плазмообразующих использовались смеси He (0.5 мбар) + H₂O (0, 0.1, 0.25 мбар) + O₂ (0, 1, 2, 3 мбар). Ток разряда составлял 35 мА, напряжение разряда зависело от состава начальной смеси и лежало в переделах (0.7-1.7) кВ.

Для интерпретации полученных результатов была создана однородная кинетическая модель, позволяющая рассчитывать поведение компонент плазмы во время разряда и после его выключения с учетом геометрических особенностей разрядной камеры. Температура газа определялась по уширению линий поглощения. Сопоставление измеренной и рассчитанной температуры газа приведено на рис. 1 слева. Модель включала в себя кинетические уравнения для плазмохимических реакций с участием частиц: электронов, молекул H₂O, OH, O₃, HO₂, H₂O₂ в основных, H₂, O₂ в основных и возбужденных электронных и колебательных состояниях, атомов и ионов. Учитывались реакции в объеме и на стенках разрядной трубы. Сопоставление эксперимента и расчетов на рис. 1 справа.

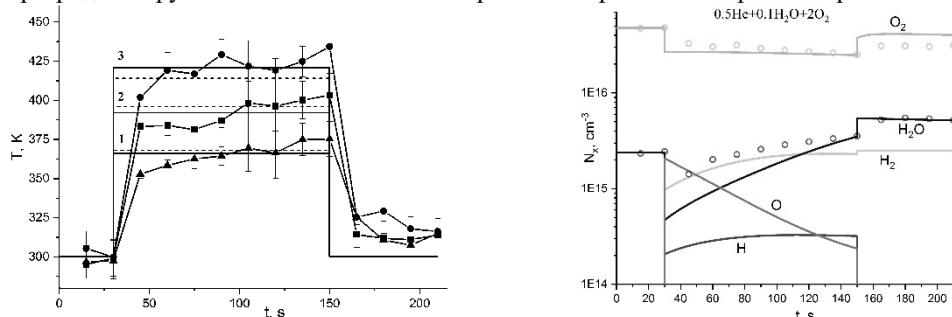


Рис. 1. Слева – сопоставление экспериментальной и расчетной зависимостей температуры газа от времени для разных начальных смесей. Смеси: 0.5 мбар He + (0.1, 0.25) мбар H₂O +: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3 мбар O₂. Маркеры – эксперимент, линии – расчет, сплошные – 0.1 мбар H₂O, пунктирные – 0.25 мбар H₂O. Справа – сравнение результатов эксперимента и расчет для смеси He (0.5 мбар) + H₂O (0.1 мбар) + O₂ (2 мбар). Маркеры – эксперимент, сплошные кривые – теория. I_d = 35 мА, U_d = 1.46 кВ.

Список литературы

1. Русанов В. Д., Фридман А. А. Физика химически активной плазмы. – Наука, 1984.

П.И. ПЕТРЕНКО^{1,2}, А.А. СТЕПАНЕНКО², А.В. ПЕРЕСЛАВЦЕВ¹,
А.В. АРТЕМОВ¹, С.А. ВОЩИНИН¹, Н.С. ЧЕМОДАНОВ¹
¹Национальный исследовательский центр НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Математические модели разложения химических веществ в пламени, а также при воздействии различных источников плазмы сталкиваются с множеством проблем, связанных со сложностью описания системы. Высокая температура процесса, ионизация и образование радикалов вносит значительные изменения в кинетику и химию системы. Недостаточно исследованы процессы разложения ароматических галогеносодержащих веществ, в частности содержащих хлор. В докладе рассмотрены существующие решения и модели.

P.I. PETRENKO^{1,2}, A.A. STEPANENKO², A.V. PERESLAVTSEV¹,
A.V. ARTEMOV¹, S.A. VOSCHININ¹, N.S. CHEMODANOV¹

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia
²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MODELING OF PLASMA PROCESSING OF CHLORINE-CONTAINING WASTES

Mathematical models of chemical decomposition in flames, as well as when exposed to various plasma sources, face many challenges due to the complexity of the system description. High process temperature, ionization and radical production introduce significant changes in the kinetics and chemistry of the system. The decomposition of aromatic halogen-containing substances, in particular those containing chlorine, has not been sufficiently investigated. Existing solutions and models are reviewed in the report.

Детальный химический процесс плазменного горения малоизучен. Существуют отдельные механизмы горения различных веществ, такие как GRI Mech 3.0 и USC Mech II [1-5], HP-Mech [6], HP-Mech/plasma [7] и кинетические модели на основе уравнений Навье-Стокса и Максвелла. Количественное кинетическое моделирование остается сложным даже в одномерном измерении. Кроме того, из-за разнообразия свойств такой системы, необходимости учета влияния плазмы на динамику химических процессов, их кинетику, а также сложности взаимодействия между плазмой, химией горения, процессами переноса и аэродинамикой, возникают трудности при определении взаимосвязи наблюдаемых явлений. В частности, во многом остаётся неизвестным, влияют ли на процессы горения только тепловые эффекты или же они дополнительно обусловлены кинетическими эффектами и иными процессами.

Основная проблема любых подобных моделей – невозможность предсказания характеристик системы и химических превращений без эксперимента. Сам эксперимент при этом необходимо организовать таким образом, чтобы минимизировать влияние различных процессов и веществ, ионов на исследуемый объект.

В литературе представлено некоторое количество исследований процессов разложения хлорсодержащих соединений, при этом наиболее часто рассматриваются простые молекулы и вещества. С другой стороны, актуальной проблемой современной промышленности являются оборот и отходы производства таких хлорсодержащих продуктов, как хлорбензол, хлористый бензил, хлортолуолы и другие ароматические соединения. На данный момент для описания процессов химического превращения соединений имеется потенциал ReaxFF [8], позволяющий работать с различными веществами, в том числе и ароматическими.

В работе представлены результаты анализа данных имеющихся исследований для разработки математической модели для изучения процессов не только горения в плазме с хлорсодержащими отходами, которая, в дальнейшем, могла бы предусматривать применение других плазмообразующих сред, а также обеспечивать воспроизводимость результатов натурных экспериментов.

Список литературы

1. Starikovskaia S. M., Starikovskii A. Y., Zatsepin D. V. Hydrogen oxidation in a stoichiometric hydrogen-air mixture in the fast ionization wave // Combustion Theory and Modelling. – 2001. – T. 5. – №. 1. – C. 97.
2. Uddi M. et al. Atomic oxygen measurements in air and air/fuel nanosecond pulse discharges by two photon laser induced fluorescence // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – T. 32. – №. 1. – C. 929-936.
3. Wang Z. H. et al. Investigation of combustion enhancement by ozone additive in CH₄/air flames using direct laminar burning velocity measurements and kinetic simulations // Combustion and flame. – 2012. – T. 159. – №. 1. – C. 120-129.
4. Sun W. et al. Kinetic effects of non-equilibrium plasma-assisted methane oxidation on diffusion flame extinction limits // Combustion and Flame. – 2012. – T. 159. – №. 1. – C. 221-229.
5. Lefkowitz J. K. et al. In situ species diagnostics and kinetic study of plasma activated ethylene dissociation and oxidation in a low temperature flow reactor // Proceedings of the Combustion Institute. – 2015. – T. 35. – №. 3. – C. 3505-3512.
6. Uddi M. et al. Atomic oxygen measurements in air and air/fuel nanosecond pulse discharges by two photon laser induced fluorescence // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – T. 32. – №. 1. – C. 929-936.
7. Ju Y., Sun W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // Progress in Energy and Combustion Science. – 2015. – T. 48. – C. 21-83.
8. Wang S., Wu X., Chen X. Detailed mechanism study of volatile organic compound decomposition and oxidation removal based on a ReaxFF MD method // RSC advances. – 2024. – T. 14. – №. 9. – C. 5863-5874.

П.И. ПЕТРЕНКО^{1,2}, А.В. ПЕРЕСЛАВЦЕВ¹, А.В. АРТЕМОВ¹,
С.А. ВОЩИНИН¹, Н.С. ЧЕМОДАНОВ¹

¹Национальный исследовательский центр НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОСТИ

Рассмотрены условия существования электрического разряда в жидкости и получение с его помощью наночастиц металлов (золей). Приведены описание плазменного многофазного реактора смешения и результаты экспериментов по получению золей металлов. Представлены результаты применения золей высокодисперсных металлов в катализических трехфазных процессах эпоксидирования, жидкофазного окисления, гидрирования. Показаны перспективы использования золей металлов для получения нанесенных металлических катализаторов.

P.I. PETRENKO^{1,2}, A.V. PERESLAVTSEV¹, A.V. ARTEMOV¹,
S.A. VOSCHININ¹, N.S. CHEMODANOV¹

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

OBTAINING NANODISPERSED METALS IN THE PLASMA OF ELECTRIC DISCHARGE IN LIQUID

The conditions of existence of electric discharge in liquid and obtaining metal nanoparticles (sols) with its help are considered. The description of plasma multiphase mixing reactor and the results of experiments on obtaining metal sols are given. The results of application of highly dispersed metal sols in catalytic three-phase processes of epoxidation, liquid-phase oxidation, hydrogenation are presented. Prospects for the use of metal sols for the preparation of applied metal catalysts are shown..

В докладе приведены данные об электрическом разряде в жидкости как одном из способов получения наночастиц металлов. Высокая температура плазмы разряда позволяет плавить и распылять вещество, а роль жидкости состоит в предотвращении слипания наночастиц. Приведены данные об аппаратном оформлении процесса, и о роли пузырьков газа, участвующих в формировании наночастиц металлов в плазме электрического разряда. Предложена математическая модель процесса.

Первые испытания были выполнены с системой «вода—медь». Использованная в качестве рабочей жидкости вода имела сопротивление 50 кОм/см. Исходный порошок меди имел размер частиц 45—70 мкм, чистоту 99,8 %. При напряжении на электродах с частотой 250 кГц и амплитудой 1,5 кВ были получены наночастицы меди размером 10—30 нм. Частицы размером более 1 мкм в системе отсутствовали. На рис. 1 показаны электронные микрофотографии образцов золя меди (наночастицы меди в воде). Проведенные испытания показали возможность глубокой переработки исходного порошка.

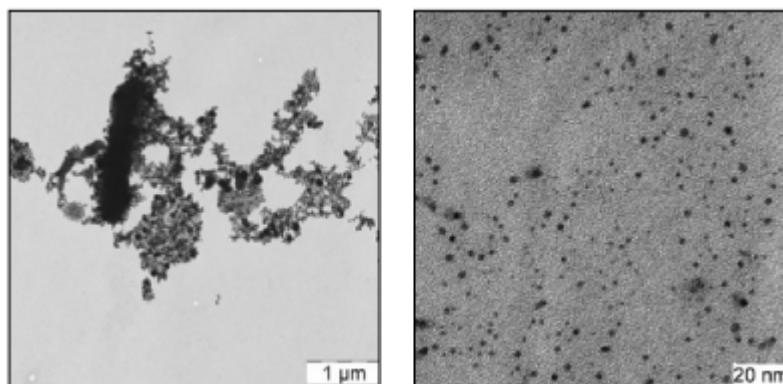


Рис.1. Электронные микрофотографии образцов золя меди

Нанодисперсные металлы, полученные в плазме электрического разряда в жидкой фазе, могут найти применение для получения нанесенных металлических катализаторов различных процессов нефтепереработки и нефтехимии. В докладе приведена математическая модель получения нанесенных катализаторов с применением метода гетерокоагуляции наночастиц на поверхности неорганических оксидов. Обсуждаются факторы, влияющие на ход процесса. Приведены результаты получения и использования катализаторов.

Список литературы

1. Артемов А.В., Кульгин В.М., Переславцев А.В. и др. Многофазный катализ с использованием наночастиц металлов, полученных электрическим разрядом в жидкости // Катализ в промышленности. – 2011. – №. 5. – С. 34-44.

Н. К. ТАКУШ, В. А. СТРЕКАЛОВ, Р.Н. КАШАПОВ
Казанский (приволжский) федеральный университет, ИИИРСИ, Казань, Россия

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

В последние годы растет интерес к применению плазменной технологии в различных областях, таких как медицина, сельское хозяйство. Одной из перспективных областей является использование низкотемпературной плазмы различных конфигураций (DBD, Jet...) для улучшения процессов обработки сельскохозяйственных культур (диэлектрического барьера разряда ДБР, Струи...) для улучшения процессов обработки сельскохозяйственных культур. Для этого необходим источник энергии, будь то радиочастота (РЧ), микроволны (МВт) или высокое напряжение (ВН). В данном исследовании представлена разработка высоковольтного источника переменного тока на основе диэлектрического барьера разряда (ДБР), который может быть использован для генерации стабильных плазменных струй с контролируемыми параметрами.

N.K.TAKOUCHE, V.A. STREKALOV, R.N. KASHAPOV
Kazan (Volga Region) Federal University, AIRSE, Kazan, Russia

DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE PLASMA JET SOURCE OF AC BASED ON A DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE FOR APPLICATION IN AGRICULTURE

In recent years, there has been growing interest in the application of plasma technology in various fields such as medicine, agriculture. One of the promising areas is the use of low-temperature plasma of various configurations (DBD, Jet...) to improve crop processing (dielectric barrier discharge DBD, Jet...) to improve crop processing. This requires an energy source, be it radio frequency (RF), microwaves (MW) or high voltage (HV). This study presents the development of a high-voltage alternating current source based on dielectric barrier discharge (DBD), which can be used to generate stable plasma jets with controlled parameters

Основная цель - разработать прототип, способный подавать переменный сигнал высокого напряжения для создания электрического поля, которое вызывает разряд между двумя электродами, подключенными к выходу трансформатора, что позволяет получить нетепловую плазму. Не существует стандартной рабочей мощности для каждого плазменного реактора, поскольку их характеристики специфичны, а применяемая мощность зависит от рабочего давления, используемого газа и других факторов. Новая простая топология источника питания, рассматриваемая для генерации сигнала переменного тока, состоит из трех основных этапов преобразования: (а) источник постоянного напряжения; (б) резонансный зарядный контур, формирующий энергию путем управления напряжением конденсатора; и (в) формирование выходного импульса с помощью трансформатора типа TBC110ПЦТ15.

Наш источник преобразования переменного/постоянного тока обеспечивает напряжение 20 В/1 А и 180 В/0,18 А. Блок зарядного устройства резонансного конденсатора (схема асимметричного мультивибратора) обеспечивает Резонансная частота зависит от составляющих синхронизации $R = R_1 + R_h$ и C_1 и определяется выражением: $f_0 = \frac{1}{2RC_1}$, 17,6 КГц и напряжение на выходе 10В. Блок питания генерирует прямоугольную волну из непрерывного сигнала, подаваемого источником. Он состоит из трех транзисторов и источника постоянного тока. Транзисторы подбираются исходя из номинальной мощности (0-150 Вт). Трансформаторный блок проводит сигнал переменного тока от источника питания до уровня, необходимого для питания используемой нагрузки. точки подключения у нас на обмотке 14-15 по 1080 витков (сопротивление обмотки 110-112 Ом). Ферриты этого трансформатора имеют низкие значения магнитных потерь в сильных магнитных полях в принятом в телевизионной технике диапазоне частот до 16КГц, повышенную величину магнитной индукции при высоких температурах окружающей среды и магнитную индукцию намагничивания для ферритов 2500Нмс^{-1} и 3000Нм^{-1} [1]. Трансформаторный блок без умножителя напряжения дает нам выходное напряжение 4,5кВ. Исследование 2D-моделирования с использованием программного обеспечения **comsol multiphysical** было проведено с использованием полученных параметров источника напряжения нашего прототипа и дало обнадеживающие результаты, близкие к определенным исследованиям [3]

Чтобы доказать эффективность электронного источника в генерации плазмы, была создана особая конфигурация плазменно-струйного реактора на основе ДБР. С такими параметрами конфигурации, как давление 0,25 бар, температура окружающей среды, аргон и выходное напряжение трансформатора 4,5 кВ, показано на рисунке 3.

Разработанный прототип полезен для создания плазменных струйных разрядов над диэлектрическим барьером, имеет потенциал для внедрения инновационных технологий в медицине и сельском хозяйстве, которые могут помочь изменить структуру сельскохозяйственных культур, с целью улучшения электрических свойств, благоприятных для лучшей устойчивости сельскохозяйственных культур к неблагоприятным воздействиям. условия.

Список литературы

- Алексеев А. "Горный воздух" на основе строчной развёртки. - Радио, 2008, № 10, с. 35, 36.
- Takouche N.K. <https://research-journal.org/archive/7-145-2024-july/10.60797/IRJ.2024.145.28> (accessed: 12.09.2024). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.28

Б. КАК^{1,3}, Е. Е. БАРМИНОВА^{1,2}

¹*Российский университет дружбы народов РУДН, Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

³*Университет Халеба, Алеппо, Сирия*

О РАДИАЦИОННОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В ИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ EBIS (EBIT)

Электронный пучок в EBIS (EBIT) проходит через захваченное ионное облако. Процесс радиационной рекомбинации (РР) в облаке влияет на генерацию ионного пучка и требует детального изучения. Исследована РР по приведенной схеме. Изучено влияние зарядового состояния иона бария на сечение РР для различных энергий электронного пучка. Приведены результаты вычислений в MATLAB.

B. KAK^{1,3}, H. Y. BARMINOVA^{1,2}

¹*Peoples Friendship University of Russia RUDN, Moscow, Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

³*University of Aleppo, Aleppo, Syria*

ON RADIATION RECOMBINATION IN ION SOURCES EBIS (EBIT)

In an EBIS (EBIT), an electron beam passes through a trapped ion cloud. The process of radiative recombination (RR) in the cloud affects the generation of the ion beam and requires detailed study. The RR was investigated according to the given scheme. The influence of the charge state of the barium ion on the RR cross-section is estimated for various energy of electron beam. Calculations in MATLAB are provided.

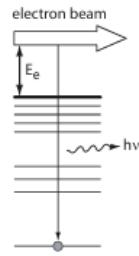
Ионные источники с электронным пучком EBIS (EBIT), работающие на принципе ионизации электронным ударом, являются перспективными источниками для генерации пучков ионов с высокой зарядностью [1]. Источники EBIS (EBIT) различных модификаций используются в фундаментальных и прикладных исследованиях в ускорительных центрах CERN (LHC), BNL (RHIC), ОИЯИ (NICA), где служат для получения ядер золота, свинца, урана и других химических элементов.

В EBIS (EBIT) электронный пучок проходит через захваченное ионное облако, где из-за столкновений с ионами происходят различные атомные процессы [2]. Из атомных процессов нас интересует радиационная рекомбинация, имеющая схему $X^{q+} + e^- \rightarrow X^{(q-1)+} + h\nu$ (см. рис.1). В настоящей работе исследовано влияние зарядового состояния иона бария на сечение РР. Сечение процессов оценивалось по формуле Кима - Пратта [3].

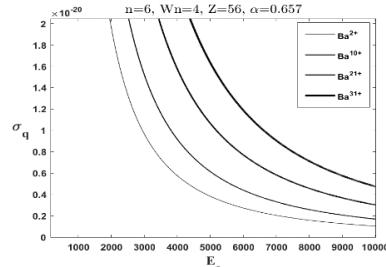
$$\sigma_q^{RR}(E_e) = \frac{8\pi}{3\sqrt{3}} \alpha \lambda_e^2 \chi_q(E_e) \ln\left(1 + \frac{\chi_q(E_e)}{2\hat{n}}\right).$$

Здесь α — постоянная тонкой структуры, $\lambda_e = \frac{\hbar}{mc} = 3.861 \times 10^{-11} \text{ cm}$ — Комптоновская длина волны электронов, для

ионов с ядерным зарядом Z и ионным зарядом (зарядовое состояние иона) q , $\chi_q(E_e) = (Z+q)^2 \frac{I_H}{4E_e}$, $\chi_q(E_e)$ — полное эффективное излучение процесса, $I_H = 13.6 \text{ eV}$ — потенциал ионизации атома водорода, E_e — энергия электронного пучка, $\hat{n} = n + (1 + W_n) - 0.3$, \hat{n} — эффективное квантовое число, n — главное квантовое число валентной оболочки и W_n — отношение числа занятых состояний к общему числу состояний в валентной оболочке. Проведены расчеты в MATLAB для различных зарядовых состояний ионов Ba при изменении энергии электронного пучка в диапазоне энергий, представляющем технологический интерес.



Rис.1. Схема процесса радиационной рекомбинации.



Rис.2. Сечения радиационной рекомбинации на ионах бария

Показано, что сечение радиационной рекомбинации растет с повышением зарядового состояния иона. С увеличением энергии электронного пучка сечение предсказуемо падает, разница в сечении РР для различных зарядовых состояний иона резко уменьшается (рис. 2).

Список литературы

1. Zschornack G. [et al.]. Electron Beam Ion Sources // arXiv preprint. [2014]. arXiv: 2014. 1410.8014v1.
2. Kim Y. S. and Pratt R. H. // Phys. Rev. 1983. A27. 2913.
3. Xiaojun Lu and Currell F.J. // Physical Review Special Topics. 2009. Vol. №12. 014401.

И.М. КОСТЫШИНА¹, Б. КАК^{1,3}, Е. Е. БАРМИНОВА^{1,2}

¹Российский университет дружбы народов РУДН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Университет Халеба, Алеппо, Сирия

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ БАРЬЕРОМ

Исследовано рассеяние плоской волны на потенциальном барьере с подвижными границами. Показана зависимость вероятности прохождения волны от подвижности границы, импульса падающей волны, высоты потенциального барьера. Полученные результаты применимы для широкого круга задач, в том числе для разработки гибридных лазерно-плазменных ускорителей заряженных частиц (LWFA) и компактных устройств с ионной ловушкой.

I.M. KOSTYSHINA¹, B. KAK^{1,3}, H. Y. BARMINOVA^{1,2}

¹Peoples Friendship University of Russia RUDN, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI Moscow, Russia

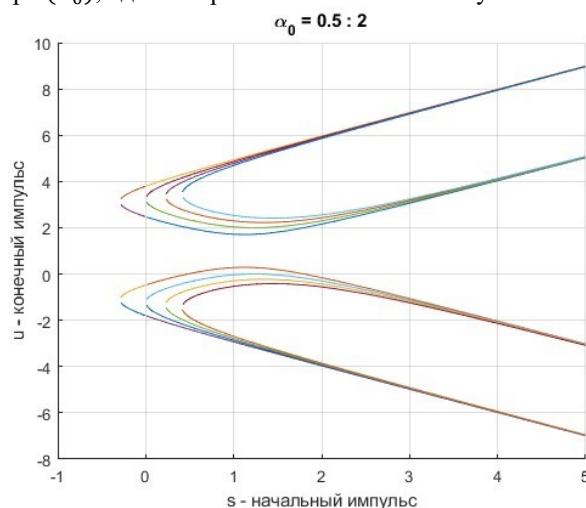
³University of Aleppo, Aleppo, Syria

PECULIARITIES OF PLANE WAVE INTERACTION WITH NONSTATIONARY POTENTIAL BARRIER

Scattering of plane wave on potential barrier with movable boundaries is studied. It is shown that probability of wave penetration depends on boundary movability, initial wave momentum and potential barrier height. The results obtained are applicable for various tasks, in particular for the development of hybrid laser-plasma accelerators (LWFA&PWFA) and ion traps.

Компактные установки на базе ионных ловушек, ускорители table-top на кильватерных волнах, в том числе гибридные лазерно-плазменные (PWFA, LWFA и их модификации) являются перспективными устройствами для эффективного ускорения заряженных частиц. Кvantovomechanicheskie аспекты функционирования и возможностей подобных систем исследованы в настоящей работе на примере взаимодействия плоской волны с потенциальным барьером. Для аналитического решения нестационарного уравнения Шредингера рассмотрена одномерная задача для барьера фиксированной высоты, с прямоугольными стенками и постоянной скоростью расширения границ [1]. Это позволило получить решения для волновой функции внутри и вне барьера для различных соотношений величин потенциальной энергии барьера и кинетической энергии, соответствующей его расширению ($\alpha_0 = 0.5 - 2.0$). На рис.1 представлены результаты вычислений в MATLAB. Величины импульсов падающей и прошедшей через барьер волны (s и соответственно), а также высота барьера представлены в безразмерном виде.

Полученные результаты позволяют утверждать, что чем медленнее расширяется потенциальный барьер, тем больше должен быть импульс падающей волны для его прохождения, причем при малых начальных импульсах присутствует сильная зависимость от параметра (α_0), однако с ростом начального импульса эта зависимость ослабевает.



Rис.1. Зависимость конечного импульса волны от ее начального импульса для ($\alpha_0 = 0.5 - 2.0$)

Список литературы

1. Barminova H.Y., Chikhachev A.S. //Journal of Russian Laser Research. 2011. Vol. 32. №. 3. P. 264-268.

ТЕМПЕРАТУРА И ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ, ПОДДЕРЖИВАЕМОЙ ВОЛНОЙ H_{011} ТИПА В СВЧ РЕЗОНАТОРЕ

Для решения задач аналитической спектрометрии создан источник возбуждения спектров на основе азотной микроволновой плазмы (МП), возбуждаемой в цилиндрическом СВЧ резонаторе с волной H_{011} . Определена температура и концентрация электронов полученной микроволновой азотной плазмы. Плазма имеет пространственно-неоднородную структуру, в следствие чего требуется использование нескольких способов определения температуры (по атомарным линиям и молекулярным полосам). Контроль температуры и концентрации электронов плазмы является эффективной оценкой для мониторинга процесса возбуждения атомов анализируемой пробы.

O. V. PELIPASOV, O. V. KOMIN, V. A. LABUSOV
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

TEMPERATURE AND ELECTRON DENSITY OF NITROGEN MICROWAVE INDUCED PLASMA IN MICROWAVE RESONATOR WITH TYPE H_{011} WAVE

To solve analytical spectrometry problems, a source of spectra excitation was created based on nitrogen microwave plasma (MP) excited in a cylindrical microwave resonator with an H_{011} wave. The temperature and electron concentration of the obtained microwave nitrogen plasma were determined. The plasma has a spatially inhomogeneous structure, which requires the use of several methods for determining the temperature (by atomic lines and molecular bands). Monitoring the temperature and electron concentration of the plasma is an effective assessment for monitoring the excitation process of the atoms of the analyzed sample.

Для решения задач аналитической спектрометрии создан источник возбуждения спектров на основе азотной микроволновой плазмы (МП), возбуждаемой в цилиндрическом СВЧ резонаторе с волной H_{011} . Полученная МП имеет пространственно-неоднородную структуру с ярко выраженной областью энерговклада СВЧ поля и «аналитическую» центральную область (рис. 1а, б). Поскольку температура (T) и концентрация электронов (n_e) являются ключевыми параметрами, определяющими эффективность процессов возбуждения атомов пробы, важным является определение и контроль этих параметров в процессе работы.

МП является неравновесной средой, состояние которой можно описать моделью частичного локального термодинамического равновесия (ЛТР). Для такой модели справедливо соотношение: $T_e > T_{ion} \approx T_{exc} > T_{rot}$, где T_e, ion, exc, rot – температура электронов, ионизации/ионов, возбуждения/атомов, вращательная/газовая, соответственно. Несмотря на нарушение модели ЛТР, для описания состояния такой плазмы оказывается вполне возможно выделение статистических ансамблей частиц, энергия возбужденных состояний которых вполне удовлетворяет распределению Больцмана (рис. 1в). Пространственная неоднородность полученной МП и изменяющийся ее состав при добавлении водного аэрозоля пробы требует использования нескольких методик определения T : в центральной области по относительным интенсивностям спектральных линий атомов пробы и по вращательным линиям молекулярной полосы OH. В периферийных же областях целесообразно использовать излучение молекул N_2 или N_2^+ , поскольку интенсивности спектральных линий атомов пробы и молекулы OH в этих областях значительно снижаются (рис. 1б). Рассчитанная T по относительным интенсивностям спектральных линий атомов Fe, Co в центральной области плазмы составила 5200 ± 300 К, а по относительным интенсивностям вращательных линий молекулярных полос OH ~ 4000 К. В периферийной области МП максимум температуры, определенной с помощью вращательных линий полосы N_2^+ , наблюдается в зоне нагрева плазмы энергией СВЧ поля и достигает ~ 4000 К. Для сравнения атомарная температура индуктивно-связанной плазмы достигает значений 5000-7000 К в центральной области плазмы и до 10 000 К в зоне нагрева плазмы энергией ВЧ поля. Газовая температура составляет ~ 5000 К.

Концентрация электронов n_e рассчитывалась с помощью уравнения Саха с использованием полученных значений T . В аналитической зоне n_e составляет около 10^{13} см⁻³, что существенно ниже значений индуктивно-связанной плазмы ~ 10^{15} см⁻³ и соответствует литературным данным для источников возбуждения спектров на основе МП.

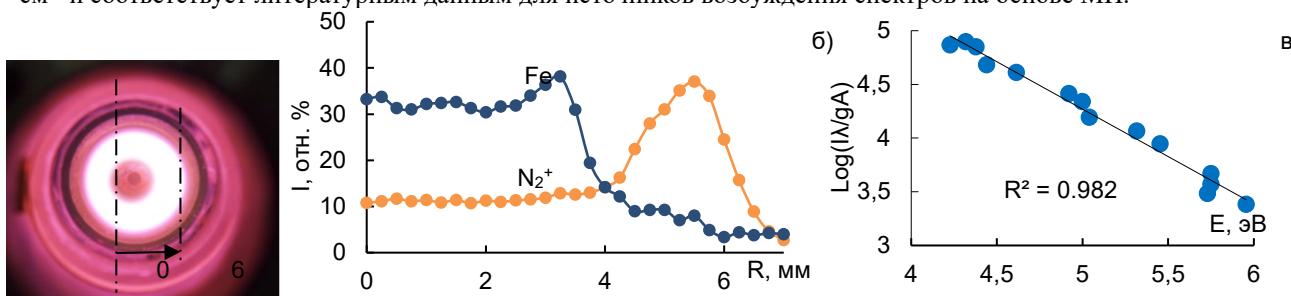


Рис. 1. Фотография аксиального изображения полученной плазмы – а); распределение интенсивности полос N_2^+ , Fe по радиусу плазмы – б); распределение заселенности энергетических уровней атомов железа для определения температуры

И.Ж. БУНИН, М.В. РЯЗАНЦЕВА, И.А. ХАБАРОВА

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Изучено изменение физико-химических свойств и состава поверхностных слоев на поверхности халькопирита и сфалерита в результате воздействия низкотемпературной плазмы импульсно-периодических высоковольтных разрядов наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления. Предварительная обработка сульфидных минералов наносекундными электромагнитными импульсами и введение при флотации реагента-депрессора сфалерита (сульфата цинка $ZnSO_4$) приводят к двукратному повышению селективности разделения сульфидных минералов.

I.Zh. BUNIN, M.V. RYAZANTSEVA, I.A. KHBAROVA

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russia

INFLUENCE OF LOW-TEMPERATURE PLASMA OF PULSED-PERIODIC HIGH-VOLTAGE DISCHARGES OF ATMOSPHERIC PRESSURE ON NON-FERROUS METAL-SULFIDE MINERALS' FLOTATION PROPERTIES

We analyzed the change in the physicochemical properties and the surface layer composition of chalcopyrite and sphalerite as a result of treatment by low-temperature plasma of pulsed-periodic high-voltage discharges in air at atmospheric pressure. The pretreatment of chalcopyrite and sphalerite by pulsed low-temperature plasma, and introduction of the sphalerite depressing agent (zinc sulfate) in the flotation process a twofold enhance in the effectiveness of separation of this sulfide minerals.

Сульфиды меди, цинка, свинца, молибдена являются главными промышленными минералами цветных металлов и, наряду с благородными металлами, относятся к основным видам стратегического минерального сырья. Повышение эффективности флотационного обогащения руд цветных металлов может быть достигнуто за счет увеличения различия в значениях потенциала и составе сорбционного слоя на поверхности разделяемых минералов под действием реагентов и/или энергетических воздействий. В докладе представлены результаты экспериментальных исследований влияния воздействия низкотемпературной атмосферной ("холодной") плазмы импульсных высоковольтных разрядов наносекундной длительности в воздухе на физико-химические и технологические (флотационные) свойства поверхности частиц халькопирита и сфалерита, выделенных из руды одного из месторождений Приморского края (Россия). Химический состав проб сульфидных минералов меди и цинка, мас. %: $CuFeS_2$: Cu 28.54, Fe 27.54, Zn 1.91, S 29.17, Pb 3.19; ZnS : Cu 0.29, Fe 4.08, Zn > 50.00, S 29.30, Pb 6.61. Генератор высоковольтных ($U_A \geq 30$ кВ) наносекундных импульсов работал на частоте 100 Гц (частота повторения импульсов); длительность переднего фронта импульса соответствовала времени пробоя разрядника и изменялась от импульса к импульсу в пределах 2–5 нс, а длительность импульса – общим временем пробоя разрядника и временем его погасания и находилась в пределах 4–10 нс. Пробы помещали на тонкую непроводящую подложку (диэлектрический барьер) со стороны плоского заземленного электрода, что создавало условия (condition like) для формирования импульсно-периодического диффузного барьера разряда атмосферного давления. Напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке длиной 0.5 мм составляла $\sim 10^7$ В \cdot м $^{-1}$. Серу на поверхности минеральных частиц определяли фотометрическим методом (спектрофотометр Shimadzu UV-1700, характеристические УФ-максимумы поглощения при 263 нм S^0 в гексане) по ее количеству, смытому гексаном с поверхности частиц.

По данным УФС установлено, что в зависимости от режима импульсно-плазменной обработки количество серы на поверхности минералов увеличивалось на 10–55%: для халькопирита на 10–33%, для сфалерита на 40–55%. Установлены отличия механизма преобразования поверхности халькопирита и сфалерита при электроимпульсном воздействии, проявляющиеся в следующих особенностях изменения химических состояний поверхностных атомов серы: для халькопирита — образование элементной серы вследствие импульсной обработки минерала в течение $t_{обр.} = 10$ с и ее удаление с поверхности с увеличением времени обработки; для сфалерита — образование метастабильного сульфида в течение первых ~ 5 с обработки с последующим формированием поли- и дисульфидной серы.

Для мономинеральной флотации сульфидов установлен рациональный режим предварительной электромагнитной импульсной обработки ($t_{обр.} = 5$ –30 с) измельченных проб (1.00 г, размер частиц от 63 до 100 мкм), при котором существенно (в среднем на 10–15%) повышалась флотируемость минералов за счет изменения фазового состава поверхности, увеличения электродного потенциала и сорбционной активности минеральных частиц. В результате кратковременной ($t_{обр.} = 10$ с) электроимпульсной обработки минералов и при подаче в процесс флотации реагента-депрессора сфалерита (сульфата цинка $ZnSO_4$, при pH=9.5) происходила активная депрессия сфалерита и существенное повышение селективности сульфидов за счет сорбции гидроксидов цинка на вновь образованных дефектах и трещинах сфалерита. Выход сфалерита в пенный продукт флотации снижался с 48% (образец в исходном состоянии) до 25.7% после импульсной обработки, т. е. более чем на 20 %. В тех же условиях флотации заметного влияния плазменно-импульсного воздействия на флотационную активность халькопирита не наблюдалось.

А.В. АРУСТАМОВ, И.Х.ХУДАЙКУЛОВ, В.П. ХАРЯКОВ.

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ул. Дурмон ўули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

СОЗДАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В ВАКУУМНОМ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ

В настоящей работе предложена основа, определяющая задачи, требующие своего решения при конструировании вакуумно-дуговых источников плазмы. В предлагаемой концепции вакуумно-дуговой источник плазмы (ВДИП) рассматривается как система, в которой выполняется генерация плазменного потока материала катода.

A.V. ARUSTAMOV, I.Kh.KHUDAYKULOV. V.P. KHARYAKOV.

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Durmon Yuli St. 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

CREATION OF PLASMA FLOW IN VACUUM ARC DISCHARGE AND FORMATION OF COATINGS

In this regard, the present work proposes a basis for determining the tasks that require their solution in the design of vacuum-arc plasma sources. In the proposed concept, the vacuum-arc plasma source (VAPS) is considered as a system in which the generation of the plasma flow of the cathode material is performed.

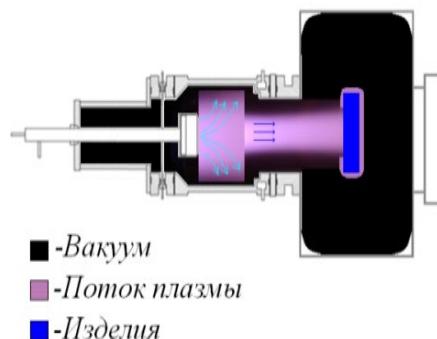
Цельной системы основ конструирования вакуумно-дуговых плазменных источников нет. Однако генерация потоков металлической плазмы на основе вакуумно-дугового разряда является эффективным методом, обеспечивающим решение научных и технологических задач [1].

Для реализации этих внутренних функций формируются подсистемы ВДИП:

1. Электрическая подсистема, включающая электроды основные и вспомогательные (инициация разряда), изоляторы, присоединительные элементы к источникам электропитания.

2 Система охлаждения, включающая рубашки охлаждения теплонапряжённых элементов конструкции, каналы для организации потока охлаждающей среды, уплотнения, присоединительные элементы к внешней системе отвода тепла.

3. Магнитная система, включающая стабилизирующие, фокусирующие катушки. Перечисленные подсистемы размещаются в элементах конструкции вакуумно-дугового источника плазмы. Конструкция ВДИП разделена на несколько узлов, по функциональным признакам в которых и размещают все функциональные элементы систем. Предлагается классифицировать плазматроны на самоустанавливающейся и с фиксированной длиной длинной вакуумного дугового разряда. На Рис.1 представлена схема реализации вакуумного дугового разряда в закрытой и открытой электродной системе по отношению к изделию реализующих указанные формы вакуумной дуги.



Rис. 1. Схема реализации вакуумного дугового разряда в закрытой и открытой электродной системе.

Конструкция вакуумного дугового источника плазмы обеспечивала формирование вакуумного дугового разряда с интегрально «холодным» катодным пятном при токах разряда $J_g = 100\text{--}400 \text{ A}$ и остаточном давлении в вакуумированном пространстве $p = 10^{-2} \text{ Pa}$ $\text{--} 10^{-3} \text{ Pa}$. Напряжение источника электрического питания разряда составляло 80В, а падение напряжения на электродах в режиме его функционирования 15–18 В.

Список литературы

1. Anders A. (Ed.). Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition. John Wiley & Sons, Inc., NY / Chichester / Weinheim / Brisbane / Singapore / Toronto, USA. 2000. 736 p.

А.В. АРУСТАМОВ, И.Х.ХУДАЙКУЛОВ, В.П. ХАРЯКОВ.

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ул. Дурмон йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

ЗАРЯДОВАЯ СИСТЕМА В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Рассмотрим элементарные процессы, происходящие в катодном пятне (КП) и плазменных многочастичных потоках вакуумно-дугового разряда. С этой целью будем считать, что КП вакуумной дуги, имеющее бесконечную протяженность, размещено параллельно вдоль поверхности бесконечно протяженного плоского катода (ПК) при сохранении величин параметров КП. В этом КП имеется область, где концентрация ионов существенно превышает концентрацию электронов.

A.V. ARUSTAMOV, I.Kh. KHUDAYKULOV, V.P. KHARYAKOV.

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Durmon Yuli St. 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

CHARGING SYSTEM IN THE CATHODE SPOT OF A VACUUM ARC

Let us consider the elementary processes occurring in the cathode spot (CS) and plasma multiparticle flows of the vacuum arc discharge. For this purpose, we will assume that the CS of the vacuum arc, which has an infinite length, is located parallel to the surface of an infinitely extended flat cathode (PC) while maintaining the values of the CS parameters. In this CS there is a region where the ion concentration significantly exceeds the electron concentration

Одним из наиболее важных физических эффектов, сопровождающих функционирование дугового разряда в вакууме, является наличие в плазме разряда аномальных ионов. Аномальность ионов связана с тем, что они движутся преимущественно в противоположном законам электричества направлении - от катода к аноду [1]. Энергии этих ионов существенно превосходят энергию, соответствующую приложенной к межэлектродному промежутку разности потенциалов.

В рассматриваемом пространственном заряде, прилегающим, с одной стороны к катоду с высокой электропроводностью, с другой - к струе хорошо проводящей квазинейтральной плазмы, есть плоскость, в которой потенциал $U=U_{\max}$ - максимальен, напряженность поля $E_0=0$, а суммарные заряды, находящиеся по обе стороны от этой плоскости равны друг другу. При этом на поверхности катода наводится отрицательный заряд, а область положительно заряженной части пространственного заряда отделена от плазмы участком, где концентрация электронов превышает концентрацию ионов. На рис. 1 представлена схема области пространственного заряда в катодном пятне вакуумной дуги у поверхности катода, иллюстрирующая процесс ионизации и формирования объемного заряда.

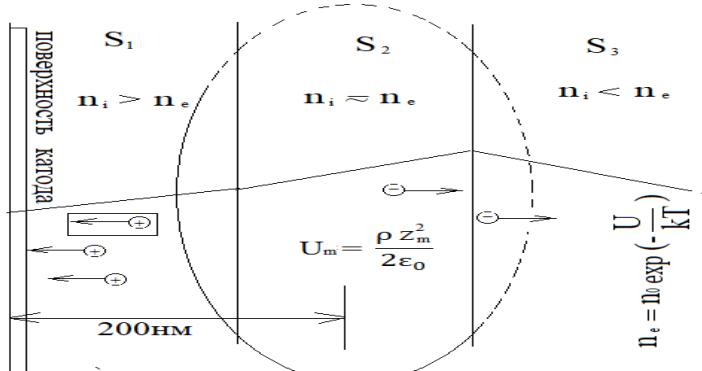


Рис. 1. Схема модели переходных процессов ионизации у поверхности катода

Образование объемного заряда в КП вакуумной дуги происходит на расстоянии нескольких нанометров от поверхности катода и обусловлено хаотическим движением заряженных частиц, генерируемых в нем. Формируемая на расстоянии 200 нм область максимального значения ионного скопления относительно поверхности катода разделяет область пространственного заряда (катодного падения потенциала) на три зоны.

Область объемных зарядов состоит из ионов высокой плотности на близких к катоду расстояниях, постоянно бомбардирующих поверхность катода. Кроме того, этот плазмоидный слой генерирует электрическое поле с напряженностью 107 В/см, что приводит к резкому увеличению эффективности процесса ионизации. На расстоянии $Z>200$ нм от поверхности катода влияние объемных зарядов в зоне S3 уменьшается за счет уменьшения разности потенциалов между катодом и объемным зарядом КП и увеличения концентрации электронов S3 зоны.

Список литературы

1. Mesyats, G. A., & Barenholts, S. A. (2002). Mechanism of anomalous ion generation in vacuum arcs. Physics-Uspekhi, 45(10), 1001.

А.В. АРУСТАМОВ, И.Х.ХУДАЙКУЛОВ. В.П. ХАРЬЯКОВ.

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ул. Дурмон ўули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ И ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ

Получение экологически чистой и коррозионностойкой продукции – одна из наболевших проблем отрасли. В данной работе рассмотрены получение покрытия нитрида титана магнетронным распылением и вакуумно-дуговым методом, а также исследование свойств слоя. Хотя слои, полученные этими двумя методами, структурно схожи, их микротвердость и поверхностная плотность заряда не повторяют друг друга.

A.V. ARUSTAMOV, I.Kh.KHUDAYKULOV. V.P. KHARYAKOV.

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Durmon Yuli St. 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

MORPHOLOGICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF THE COATING OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING AND VACUUM-ARC METHOD

Obtaining environmentally friendly and corrosion-resistant products is one of the pressing problems of the industry. This paper examines the production of titanium nitride coatings by magnetron sputtering and vacuum arc methods, as well as the study of the layer properties. Although the layers obtained by these two methods are structurally similar, their hardness and surface charge density do not repeat each other.

Актуальной задачей является получение функциональных износостойких твердосплавных покрытий с тугоплавкими металлами, их карбидами иnanoуглеродными частицами, используемых для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин и механизмов. [1].

В рассмотренных работах одновременно исследовались разные характеристики и морфология образцов, полученных магнетронным распылением и вакуумно-дуговым методом. В данной работе изучались РФА и шероховатость поверхности образцов, полученных этими двумя методами.

В данной работе после первичной очистки поверхности стекла представлены методы магнетронного распыления и вакуумно-дугового напыления. Первоначально на поверхность образца методом магнетронного распыления наносился слой нитрида титана. Магнитное поле в источнике магнетронного распыления составляет 0,8-1,0 Тл, вдув аргона осуществляется в условиях вакуума, остаточное давление 10^{-1} - 10^{-2} Па. В качестве рабочего напряжения было выбрано 200-400В. Время роста слоя образца составляло 20-30 мин.

При вакуумном дуговом разряде очистку и напыление образцов производили в вакууме $5 \cdot 10^{-4}$ Па, токе дуги 150-350A. Температура поверхности образца в начальный момент нанесения покрытия была в пределах (473.15-523.15) К. Достижение этого значения температуры поверхности обеспечивалось вакуумно дуговыми разрядами, при токе разрядов 350A. В режиме нанесения покрытия, ток вакуумного дугового разряда составлял 150A, а падение напряжение на дуговом промежутке 40 В. Осаждение покрытий на обработанную поверхность образца осуществлялось со скоростью напыления $0.035 \cdot 10^{-6}$ м/с, толщина нанесенного покрытия составила 3-4 мкм.

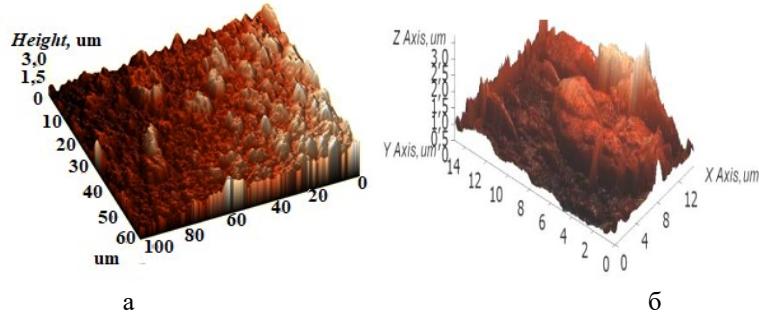


Рис. 1. АСМ-изображение образцов, полученных двумя разными методами: а) магнетронный метод, б) вакуумно-дуговой метод

В данной работе мы показали разницу между слоем нитрида титана, полученным с использованием магнетронного источника рассеяния ионов и вакуумно-дугового метода. Толщина полученных пленок составляет 3-4 мкм, при этом в слое, полученном магнетронным методом, виден относительно плоский слой, а в слое, полученном вакуумно-дуговым методом, видна плоская поверхность. В результатах, полученных вакуумно-дуговым методом, скорость роста значительно выше, а взаимодействие атомарных атомов с поверхностью значительно выше, что обуславливает прочность слоя. Магнетронным методом можно получить плоский слой.

Список литературы

1. Б.И. Михайлов. // Теплофизика и аэромеханика. 2008, том 15, № 2. С. 325-340.

Секция

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО
ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И НАНОСИСТЕМ**

Руководитель секции – д.ф.-м.н., профессор Менушенков
Алексей Павлович

Секретарь секции – к.ф.-м.н., Кузнецов Алексей
Владимирович

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8020
E-mail: AVKuznetsov@mephi.ru

Д.А. АБИН¹, А.С. СТАРИКОВСКИЙ¹, А.Ю. МАЛЯВИНА¹, И.В. МАРТИРОСЯН^{1,2},
С.В. ПОКРОВСКИЙ¹, Р.Г. БАТУЛИН², П.А. ФЕДИН³, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ³, Т.В. КУЛЕВОЙ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ МАГНИТНЫХ ИОНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП КОМПОЗИТОВ

Рассмотрено влияние ионного облучения (ионы Fe²⁺ E=5,6 MeV, Co²⁺ E=5,9 MeV) в режимах создания радиационных дефектов и имплантации на критический ток высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент. Показано повышение критического тока в режиме имплантации ионов при флюенсе $\Phi=2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, в то время как в режиме радиационных дефектов наблюдается небольшое падение.

D.A. ABIN¹, A.S. STARIKOVSKII¹, A.Y. MALYAVINA¹, I.V. MARTIROSYAN^{1,2}, S.V. POKROVSKII¹,
R.G. BATULIN², P.A. FEDIN³, K.E. PRIANISHNIKOV³, T.V. KULEVOY³

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

³National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

INFLUENCE OF IMPLANTATION OF MAGNETIC IONS ON THE CHARACTERISTICS OF HTS COMPOSITES

The effect of ion irradiation (Fe²⁺ E=5,6 MeV, Co²⁺ E=5,9 MeV) in the modes of creation of radiation defects and implantation on the critical current of high-temperature superconducting (HTS) tapes is considered. An increase in the critical current is shown in the ion implantation mode at a fluence of $F=2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, while a slight drop is observed in the radiation defect mode.

Высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) композитные ленты второго поколения – перспективные материалы для разработки источников высоких магнитных полей, в том числе для ускорителей и токамаков, где сверхпроводники могут подвергаться длительному воздействию радиационного излучения. Такое воздействие может приводить как к снижению токонесущей способности ВТСП, так и к увеличению, вследствие образования дополнительных центров пиннинга для вихрей магнитного поля.

Было проведено облучение ионами Fe²⁺ с энергией 5,6 МэВ образцов с различной толщиной серебряного покрытия с флюенсом $2,0 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Для исследований использовалась промышленная REBCO (RE – редкоземельный элемент) ВТСП лента производства «С-Инновации» с критическим током порядка 150 А при температуре кипения жидкого азота 77 К и шириной 4 мм. Изучались как образцы с открытым сверхпроводящим слоем, так и с серебряным покрытием толщиной 1,5 мкм. Показано, что критический ток увеличился у образца с серебряным покрытием и уменьшился у образца с открытым сверхпроводящим слоем. Моделирование в программном пакете SRIM/TRIM показало, что для образца с открытым сверхпроводящим слоем подавляющее число имплантированных ионов приходится на более глубоко расположенные слои, а в сверхпроводящем преобладают радиационные дефекты типа вакансия. Для образца с серебряным покрытием значительная часть ионов имплантируется в сверхпроводящий слой.

Пиннинг можно усилить, добавив к структурным дефектам магнитные, которые за счет дополнительного магнитного взаимодействия приведут к увеличению силы пиннинга. В качестве второго магнитного иона был выбран Co²⁺. Облучение образцов проводилось несколькими флюенсами для 4-х различных режимов создания дефектов, при которых последовательно имплантация ионов отсутствовала, а затем концентрация магнитных ионов в ВТСП слое повышалась вплоть до режима полной остановки ионов в сверхпроводящей матрице (брэговский пик находился в середине ВТСП слоя). Различные режимы имплантации были реализованы за счет вариации толщин слоя Ag, что приводило к различным проективным пробегам ионов, которые были предварительно рассчитаны с помощью пакета SRIM. Было показано, что при определенных условиях облучения и режимов имплантации магнитных ионов Co²⁺ наблюдается повышение намагниченности и критического тока как в нулевом поле, так и в полях до 8 Тл.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00398, <https://rsrf.ru/project/24-22-00398/>.

Ю.В. АГРАФОНОВ, И.С. Петрушин, Д.В. Халаимов, И.В. Безлер, Р.Ю. ЛЕОНТЬЕВ
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

АППРОКСИМАЦИЯ ПЕРКУС-ЙЕВИКА ПРЯМОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ГРАНИЧНЫХ СЛОЁВ ЖИДКОСТЕЙ

Одночастичная функция распределения, задающая изменение плотности жидкости вблизи твердой поверхности, обычно описывается синглетным нелинейным интегральным уравнением, ядро которого представлено бесконечным функциональным рядом неприводимых диаграмм. Показано, что в приближении Перкус-Йевика этот ряд можно переопределить, выделив в нём слагаемые, приводящие к линейному интегральному уравнению для одночастичной функции распределения. Вклад остальных слагаемых можно представить в виде функции, являющейся решением уравнения Вольтерра первого рода.

YU.V. AGRAFONOV, I.S.PETRUSHIN, D.V. KHALAIMOV, I.V. BEZLER, R.YU. LEONTIEV
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

PERCUS-YEVICK APPROXIMATION OF THE DIRECT CORRELATION FUNCTION OF THE BOUNDARY LAYERS OF LIQUIDS

A single-particle distribution function specifying a change in the density of a liquid near a solid surface is usually described by a singlet nonlinear integral equation, the core of which is represented by an infinite functional series of irreducible diagrams. It is shown that in the Percus-Yevick approximation, this series can be redefined by extracting terms in it leading to a linear integral equation for a single-particle distribution function. The contribution of the remaining terms can be represented as a function, which is a solution to the Volterra equation of the first kind.

Микроструктурная характеристика жидкостей (ближний порядок) задается парной корреляционной функцией $h_{12}(r_{12})$ и определяет вероятность обнаружения произвольной пары на заданном расстоянии r_{12} между ними. Знание парной корреляционной функции позволяет рассчитать все термодинамические величины макроскопических жидкостей. Функция $h_{12}(r_{12})$ связана с прямой корреляционной функцией $c_{12}(r_{12})$ интегральным соотношением Орнштейна-Цернике. В свою очередь, $c_{12}(r_{12})$ представлено бесконечным функциональным рядом неприводимых диаграмм от функции $h_{12}(r_{12})$. Вычисление неприводимых диаграмм практически невозможно, поэтому прямая корреляционная функция $c_{12}(r_{12})$ обычно аппроксимируется какой-либо алгебраической функцией. Логическое обоснование такой замены отсутствует, тем не менее, такой подход до сих пор активно используется и приводит к приближенным нелинейным интегральным уравнениям для парной корреляционной функции $h(r_{12})$. Наиболее известными из них являются аппроксимации Мартынова-Саркисова, гиперцепное и Перкус-Йевика. Достоинством последней аппроксимации является то, что прямая корреляционная функция $c_{12}(r_{12})$ вычисляется аналитически.

Для жидкостей, граничащих с твёрдой поверхностью, описывается парной корреляционной функцией $h_{12}(r_{12}, z_1, z_2)$, которая зависит от расстояния между центрами частиц r_{12} и от удаления каждой из них от твёрдой поверхности z_1, z_2 . Кроме того, необходимо учитывать локальную плотность вблизи поверхности $n(z_1) = \frac{N}{V} G_1(z_1)$, учитывающую её изменение по сравнению с объёмным значением $\frac{N}{V}$. Здесь $G_1(z_1)$ – одночастичная функция распределения, задающая вероятность обнаружения частицы на заданном удалении от поверхности z_1 . Функции $h_{12}(r_{12}, z_1, z_2)$ и $G_1(z_1)$ находятся решением обобщённых интегральных соотношений Орнштейна–Цернике [1–2], ядра которых являются бесконечными рядами неприводимых диаграмм. Знание этих функций позволяет рассчитать термодинамические характеристики граничных слоёв жидкостей.

Нами показано, что аппроксимацию Перкус-Йевика можно применить для вычисления суммы $S_1(z_1)$ бесконечного ряда неприводимых диаграмм в уравнении для одночастичной функции распределения $G_1(z_1)$. Показано, что $S_1(z_1)$ удовлетворяет линейному интегральному уравнению Вольтерра первого рода.

Список литературы

1. Agrafonov Y.V., Petrushin I.S. Using Molecular Distribution Functions to Calculate the Structural Properties of Amorphous Solids. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 84, 783–787 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3103/S106287382007003>.
2. Yu.V. Agrafonov, I.S. Petrushin. Modification of the singlet equation for a molecular system of solid spheres near a solid surface in the Percus-Yevick approximation Journal of Physics: Conference Series 1686 (2020) 012039 IOP Publishing <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1686/1/0120>.

Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, И.В. МАРТИРОСЯН, М.А. ОСИПОВ,
А.С. СТАРИКОВСКИЙ, С.В. ПОКРОВСКИЙ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МАГНИТО-ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНОГО ВСТП ПОДШИПНИКА

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования гибридного магнитного ВСТП подшипника. Проведены расчеты распределения магнитного поля, механических напряжений, а также вертикальных и радиальных левитационных сил при соответствующих смещениях ротора подшипника. Рассмотрено влияние разбалансировки и ударных нагрузок на механические свойства системы.

D.A. ALEKSANDROV, I.V. MARTIROSIAN, M.A. OSIPOV, A.S. STARIKOVSKII, S.V. POKROVSKII
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MAGNETIC FIELD AND FORCE CHARACTERISTICS OF HYBRID HTS BEARING

This paper presents the results of numerical modeling of a hybrid magnetic HTS bearing. Calculations of magnetic field distribution, mechanical stresses, and vertical and radial levitation forces at corresponding displacements of the bearing rotor are performed. The influence of unbalance and shock loads on the mechanical properties of the system is considered.

Магнитные подшипники в сравнении с механическими подшипниками обладают такими преимуществами, как бесконтактное взаимодействие, высокая надежность и долговечность. Кроме того, эти подшипники могут эффективно работать в экстремальных условиях, таких как вакуум, высокие рабочие скорости, экстремальные температурные диапазоны (как низкие, так и высокие), а также в жестких химических условиях, таких как кислотная или щелочная среда. Эти характеристики делают магнитные подшипники исключительно конкурентоспособными в различных областях, включая биологические науки, экологически чистое производство, транспорт, аэрокосмическую промышленность [1] и энергетику [2]. При этом магнитные подшипники, использующие в своей конструкции высокотемпературные сверхпроводники (ВСТП), не требуют активной системы управления [3].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования гибридного магнитного подшипника с использованием стопок и обмоток ВСТП лент и различных сборок постоянных магнитов. Моделирование проводилось методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics, где численно решались нестационарные уравнения Максвелла в комбинированной А-Т-Н формулировке. Расчеты проведены с учетом тепловой зависимости критических параметров сверхпроводящих лент от температуры. Также проведен расчет механических напряжений в гибридном подшипнике, а также расчет вертикальной и радиальной сил левитации при различных рабочих температурах в системе.

В настоящей работе представлены следующие результаты:

- распределение магнитного поля гибридного подшипника в конфигурации переменного направления намагниченности в постоянных магнитах и в конфигурации массива Халбаха;
- зависимости сил магнито-левитационного взаимодействия между постоянными магнитами и ВСТП элементами при вертикальном и радиальном смещении ротора подшипников;
- зависимости левитационных сил в системе от температуры при намагничивании в режиме охлаждения в нулевом поле (режим ZFC) и при на намагничивании в режиме охлаждения в присутствии внешнего магнитного поля (режим FC);
- рассмотрено влияние разбалансировки и ударных нагрузок на механические свойства системы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>.

Список литературы

1. Li X., Palazzolo A., Wang Z. A combination 5-DOF active magnetic bearing for energy storage flywheels //IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2021. – Т. 7. – №. 4. – С. 2344-2355.
2. Huang Z. et al. Magnetic bearing: structure, model, and control strategy //The International Journal of advanced manufacturing technology. – 2024. – Т. 131. – №. 5. – С. 3287-3333.
3. Supreeth D. K. et al. A review of superconducting magnetic bearings and their application //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2022. – Т. 32. – №. 3. – С. 1-15.

М.В. БАЛАКИНА, А.Ю. МАЛЯВИНА, А.А. МИХАЙЛОВ,
К.А. БОРОДАКО, Д.А. АБИН, С.В. ПОКРОВСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СБОРОК НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ

В данной работе представлены результаты исследования поперечной теплопроводности стопок высокотемпературных сверхпроводящих лент, собранных по различным технологиям. Представлена автоматизированная установка для измерения теплопроводности в широком температурном диапазоне. Приведены результаты сравнения для образцов, имеющих различное число лент в стопке.

M.V. BALAKINA, A.Y. MALYAVINA, A.A. MIKHAILOV,
K.A. BORODAKO, D.A. ABIN, S.V. POKROVSKI

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THERMAL CONDUCTIVITY STUDY OF STACKS BASED ON HTS TAPES

This study presents the results of an investigation into the transverse thermal conductivity of stacks of high-temperature superconducting tapes assembled using various technologies. An automated setup for measuring thermal conductivity over a wide temperature range is presented. The results of comparisons for samples with different numbers of tapes in the stack are provided.

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) второго поколения на основе соединения $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\chi}$ применяются в виде лент со слоистой архитектурой. Они находят все более широкое применение в создании различных сверхпроводящих устройств, таких как сверхпроводящие кабели [1], высокополевые магниты [2] и накопители энергии [3]. Эффективность работы этих устройств во многом зависит от условий охлаждения, так как для поддержания сверхпроводящего состояния необходимы низкие температуры. В этой связи при проектировании систем охлаждения и анализе нестационарных процессов, способных привести к переходу сверхпроводника в нормальное состояние, важно учитывать теплопроводность ВТСП лент. Кроме того, в многослойных обмотках требуется учитывать теплопроводность лент, как в продольном, так и в поперечном направлениях, а также процессы распространения и передачи тепла между слоями.

В данной работе представлены результаты измерения теплопроводности в поперечном направлении для стопок ВТСП лент производства компании «С-Инновации» с шириной 4 мм и критической температурой 92 К. Исследовались ВТСП стопки лент различной толщины, собранные по технологиям склеивания и спаивания. Для каждого образца количество ВТСП лент в стопке варьировалось от 5 до 10. В качестве припоя для пайки использовался оловянно-свинцовый ПОС-61. В технологии склеивания два вида эпоксидного клея: двухкомпонентная эпоксидная смола ТО-29-2 и эпоксидная смола ЭД-22 с ИзоМТГФА в качестве отвердителя и порошком кристобалита в качестве теплопроводящих включений.

Для измерения поперечной теплопроводности была спроектирована, изготовлена и автоматизирована экспериментальная установка, позволяющая получать данные с приборов в режиме реального времени. Измерения проводились в широком температурном диапазоне от 50 до 150 К. Вначале был получен график зависимости коэффициента теплопроводности индия от температуры, позволяющий откалибровать измеренные данные с учетом теплопроводности контактов. Проведены сравнения коэффициентов поперечной теплопроводности между образцами, собранными по технологиям склейки и спайки, а также между стопками, собранными из разного числа лент. В случае склеивания ВТСП лент в стопки значение коэффициента теплопроводности в поперечном направлении практически одинаковы, что не позволяет сделать однозначный вывод о выборе связующего вещества. Значения поперечной теплопроводности для спаянных образцов на два порядка выше, чем для образцов, изготовленных с помощью склейки. Значение поперечного коэффициента теплопроводности для образца, спаянного из 5 ВТСП, на 20% больше, чем для образца, спаянного из 10 ВТСП лент. Такое различие хорошо объясняется меньшим количеством сверхпроводящих слоев, имеющих низкое значение поперечного коэффициента теплопроводности. Сравнивая значения поперечного и продольного коэффициентов теплопроводности ВТСП лент [4], показана высокая степень анизотропии сверхпроводника.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>.

Список литературы

1. Wang M., Ning F., Pei Y. and others// IEEE Trans. Appl. Supercond. 2024. Vol. 34, №. 4. Р. 1-9.
2. Park H., Kim G., Choi K. and others// IEEE Trans. Appl. Supercond. 2024. Vol. 34, №. 5. Р. 1-5.
3. Jubleanu R. and Cazacu D. // Magnetochemistry. 2023. Vol. 9, №. 10. Р.216
4. Покровский С.В., Малевина А.Ю., Батулин Р.Г., Руднев И.А. // Кабели и провода 2023. Vol. 6P. 14-18.

Н.А. БОНДАРЕВ¹, К.А. БОРОДАКО¹, Н.Н. ТАТАРНИКОВ², А.В. ШЕЛЯКОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия

ХОЛОДНОКАТАНЫЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА TiNiCu С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Тонкие ленты из быстрозакаленного сплава TiNiCu являются прекурсором для создания микро- и нанопинцетов для систем манипулирования микро- и нанообъектами. Для уменьшения их толщины в работе использовалась холодная прокатка образцов лент в аморфном состоянии. После прокатки с усилиями на валках до 12 тонн толщина лент уменьшилась в 1,2-1,5 раза. Показано, что после изотермической кристаллизации в прокатанных лентах наблюдается эффект памяти формы . Установлено, что прокатка приводит к уменьшению характерных температур мартенситного превращения, сужению гистерезиса превращения, снижению величины эффекта памяти формы, а также к уменьшению шероховатости поверхности лент как с их контактной, так и со свободной стороны.

N.A. BONDAREV¹, K.A. BORODAKO¹, N.N. TATARNIKOV², A.V. SHELYAKOV¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia

COLD-ROLLED RAPIDLY QUENCHED TiNiCu SHAPE MEMORY ALLOYRIBBONS

Rapidly quenched TiNiCu alloy thin ribbons are a precursor for creating micro- and nanotweezers for micro- and nanoobject manipulation systems. Cold rolling of ribbons in an amorphous state was used in the work to reduce their thickness. After rolling with roll forces of up to 12 tons, the thickness of the ribbons decreased by 1.2-1.5 times. It is shown that after isothermal crystallization, the shape memory effect was formed in the rolled ribbons. It has been found that rolling leads to a decrease in the characteristic temperatures of martensitic transformation, a narrowing of the transformation hysteresis, a decrease in the magnitude of the shape memory effect, as well as to a decrease in the surface roughness of the ribbons both on their contact and free sides.

Для создания микромеханических устройств и микроэлектромеханических систем, применяемых в современных областях науки и техники, актуально использование сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) [1]. Для этих применений необходимы тонкомерные материалы с ЭПФ. Среди них одним из наиболее перспективных является сплав Ti₅₀Ni₂₅Cu₂₅ (ат. %) [2] благодаря тому, что он может быть получен в виде однородной тонкой ленты в аморфном фазовом состоянии с помощью метода сверхбыстрой закалки из расплава, а после кристаллизации проявляет ярко выраженный ЭПФ [3]. На основе быстрозакаленных лент изготовлен ряд микроустройств, включая микропинцеты и нанопинцеты [4], однако толщина таких лент лежит в диапазоне от 30 до 60 мкм, в то время как для многих микро- и наномеханических применений необходимо значительное уменьшение ее величины. Одним из способов уменьшения толщины в металлических материалах и сплавах является деформационная прокатка. В настоящей работе изучено влияние холодной прокатки на свойства быстрозакаленных лент из сплава TiNiCu.

В качестве объектов исследования были выбраны тонкие ленты из сплава Ti₅₀Ni₂₅Cu₂₅ (ат. %) шириной 1,73; 3,22; 1,52 мм и толщиной 30; 49; 35,5 мкм, соответственно, полученные в аморфном состоянии методом сверхбыстрой закалки из расплава. Образцы для исследования были изготовлены с помощью прокатки на двадцативалковом прокатном стане с диаметрами рабочих валков от 8 до 12 мм [5]. Для придания ЭПФ образцы лент кристаллизовались в печи при температуре 500°C в течение 360 с.

Микроструктура образцов изучалась с помощью инвертированного металлографического микроскопа отраженного света «Carl Zeiss Axiovert 40 MAT». Исследование шероховатости поверхностей образцов проводили с помощью профилометра Veeco Dektak 150. Для исследования термомеханических свойств образцов использовалась лабораторная установка, измеряющая деформацию образцов растяжением при термоциклировании под постоянной нагрузкой.

Из полученных температурных зависимостей деформации образцов было установлено, что прокатка привела к уменьшению температур прямого и обратного мартенситного на 4-7°C и сужению гистерезиса превращения. Кроме того, наблюдалось заметное уменьшение величины ЭПФ. В то же время холодная прокатка существенно уменьшает шероховатость поверхности лент по сравнению с исходной как с контактной, так и со свободной стороны ленты, что может способствовать улучшению качества изготавливаемых из данной ленты микро- и наноустройств.

Работа выполнена в рамках Госзадания.

Список литературы

1. Mehrpouya M., Cheraghi Bidsorkhi H. // MicroNanosyst.2016. Vol. 8, №2. P. 79-91.
2. Liu Y. // Mater. Sci. Eng.: A. 2020. Vol. 354. P. 286-291.
3. Shelyakov A.V., Sevryukov O.N., Sitnikov N.N. and others // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 1686. 012056.
4. Shelyakov A., Sitnikov N., Borodako K. and others //J. Micro-Bio. Robot. 2020. Vol. 16. P. 43-51.
5. Татарников Н.Н., Юсупов В.С., Белелюбский Б.Ф. // МИКМУС-2021. 2021. С. 182-187.

К.А. БОРОДАКО, И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ,
С.В. ВЕСЕЛОВА, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Исследуются характеристики CORC кабеля в качестве токонесущего элемента сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии. Намотаны CORC кабели на основе промышленных ВТСП лент второго поколения (RE) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ производства компании «С-Инновации» с одним и двумя слоями ВТСП ленты. Измерены значения критического тока кабелей в исходном состоянии и после деформации изгиба на различных диаметрах. Проведена разработка численных моделей CORC кабелей и анализ их транспортных и тепловых характеристик. Определены подкритические режимы работы, места возникновения возможных тепловых нестабильностей системы, даны рекомендации по работе элементов в конструкции сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии.

K.A. BORODAKO, I.V. MARTIROSIAN, D.A. ABIN, M.A. OSIPOV,
S.V. VESELOVA, D.A. ALEKSANDROV, S.V. POKROVSKII

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CHARACTERISTICS OF CURRENT-CARRYING ELEMENTS OF SUPERCONDUCTING INDUCTIVE ENERGY STORAGE DEVICE

The characteristics of a CORC cable as a current-carrying element of a superconducting inductive energy storage device are being investigated. CORC cables based on second-generation industrial HTS tapes (RE) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ produced by S-Innovations with one and two layers of HTS tape. The values of the critical current of cables in the initial state and after bending deformation at various diameters are measured. Numerical models of CORC cables have been developed and their transport and thermal characteristics analyzed. Subcritical operating modes, locations of possible thermal instabilities of the system are determined, and recommendations are given on the operation of elements in the design of a superconducting inductive energy storage device.

Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИН) служит для хранения энергии в виде магнитного поля, создаваемого электрическим током, протекающим по замкнутой электрической цепи. Перспективным материалом для изготовления токонесущих элементов индуктивных накопителей энергии является высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) лента 2-ого поколения. Одним из главных конструкционных элементов такого накопителя является сверхпроводящая катушка [1]. Для формирования сверхпроводящих катушек в форме соленоида, как правило, используется сверхпроводящий кабель. В качестве основного конструкционного СПИН в рамках настоящей работы исследуется CORC (conductor on round core – проводник на круглом сердечнике) кабель [2-4], который изготавливается путём намотки нескольких ВТСП лент на цилиндрическую полую трубку.

Для прогнозирования режимов работы СПИН и расчета характеристик всей системы проведено численное моделирование потерь в различных режимах охлаждения (полное погружения кабеля в жидкий хладагент и прокачка жидкого хладагента по внутреннему диаметру мельхиоровой трубы) и электрической нагрузки, а также расчет параметров перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное. Независимо от типа конструкции СПИН (тороидальная катушка, соленоид или другая конфигурация) необходимо знать предельные режимы работы кабеля и его критические характеристики в реальных эксплуатационных условиях. Это включает в себя исследование характеристик при изгибе, анализ потерь в кабеле при циклической токовой и магнитной нагрузке, а также моделирование температурных распределений системы при различных условиях охлаждения. Для этого разработаны модели для CORC кабелей и проведены расчеты характеристик системы при циклической нагрузке.

Показано, что охлаждение кабеля посредством полного погружения в хладагент приводит к потерям на порядки меньшим, нежели при охлаждении за счет пропускания хладагентов по внутреннему диаметру формера. Были исследованы элементы индуктивного накопителя – образцы CORC кабелей с различным числом лент в повиве. Выполнены измерения критического радиуса изгиба кабелей. Намотка ВТСП лент под углом 22 градуса относительно оси трубы и усилии 1 кг не приводит к возникновению резистивной составляющей на ВАХ кабеля. Минимальный диаметр изгиба кабеля, полученного при намотке ВТСП ленты на трубку диаметром 5 мм, составил не более 15 см. Полученные результаты будут в дальнейшем применены для численного анализа и проектирования СПИН.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00278, <https://rscf.ru/project/24-79-00278/>.

Список литературы

1. Lieurance D., Kimball F., Rix C. and others// IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. Vol. 5, № 2. P. 350-353.
2. Uglietti D. // Supercon. Sci. Technol. 2019. Vol. 32, № 5. 053001.
3. Van Der Laan D.C., McRae D.M., Weiss J.D. // Supercon. Sci. Technol. 2018. Vol. 32, № 1. 015002.
4. Wang X., Sheng J., Li X. F. and others // J. Energy Storage. 2023. Vol. 58. 106386.

С.В. ВЕСЕЛОВА, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, К.А. БОРОДАКО, Д.А. АБИН,
М.А. ОСИПОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В ЭЛЕМЕНТАХ СПИН

В настоящей работе было проведено исследование элемента сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии (СПИН), состоящего из промышленно-произведенного CORC (conductor on round core – проводник на круглом сердечнике) кабеля. Был создан экспериментальный стенд с датчиком газа, испарившегося в процессе условий, имитирующих реальную работу накопителя. Были получены данные для различных амплитуд пропускаемого тока. Показано, что даже в условиях работы более, чем $0,5 I_c$, процентное соотношение тепловых потерь не превышает 7% от стационарного состояния.

S.V. VESELOVA , A.S. STARIKOVSKII, K.A. BORODAKO, D.A. ABIN,
M.A. OSIPOV, S.V. POKROVSKII

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

HEAT LOSSES IN SMES ELEMENTS

In this work, an element of a SMES (superconducting magnetic energy storage) was studied, consisting of an industrially produced CORC (conductor on round core) cable. An experimental stand was created with a sensor for gas vaporized during conditions simulating the actual operation of the storage device. Data were obtained for various amplitudes of the transmitted current. It is shown that even under operating conditions of more than $0.5 I_c$, the percentage of heat losses does not exceed 7% of the stationary state.

Сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН) [1-3] широко используются в различных энергетических системах для высокоэффективного сохранения электроэнергии. В процессе эксплуатации зарядка происходит при помощи выпрямления тока, а разрядка при помощи его инвертирования. Это влечет за собой возникновение потерь в элементах СПИН во время его работы. Более того, в условиях переменного тока возникают локальные нагревы сверхпроводящего слоя, что может привести к возникновению квичча.

Так как из-за большого количества физических процессов, протекающих во время заряда и разряда накопителя, расчет может быть очень затруднительным, то для исследования этой проблемы был создан экспериментальный стенд, включающий в себя азотный криостат с образцом, килоамперный источник тока и микротермальный счетчик газа. В качестве исследуемого образца использовался CORC (conductor on round core – проводник на круглом сердечнике) кабель на основе ВТСП лент в виде геликоидальной катушки с номинальным критическим током 1700 А. К образцу через крышку криостата были подведены токовводы и потенциальные провода. Эксперимент был произведен для амплитуд тока низкой частоты от $0,15 I_c$ до $0,5 I_c$. Разворотка тока до максимального значения составляла 100 мс. Значение напряжения в ходе всего эксперимента не превышало 35 нВ. Расчет потерянной энергии был произведен с учетом параметра теплоты парообразования для жидкого азота, составляющего $r = 159,6 \text{ кДж/л}$.

Показано, что существует зависимость роста потерь с увеличением пропускаемого тока. Тем не менее, полученные значения остаются низкими (в пределах 13-52 мДж/цикл) по сравнению с общей запасаемой энергией СПИН (порядка 1,2 кДж для данной геометрии), что свидетельствует о высоком КПД системы в условиях работы. Таким образом, было показано, что CORC кабель, используемый в качестве элемента накопителя СПИН, имеет высокий КПД в процессе ввода-вывода электромагнитной энергии.

Исследование выполнено в рамках государственного задания FSWU-2025-0008.

Список литературы

1. Luongo C. A. Superconducting storage systems: An overview //IEEE Transactions on Magnetics. – 1996. – Т. 32. – №. 4. – С. 2214-2223.
2. Molina M. G., Mercado P. E., Watanabe E. H. Improved superconducting magnetic energy storage (SMES) controller for high-power utility applications //IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2011. – Т. 26. – №. 2. – С. 444-456.
3. Yuan W. et al. Design and test of a superconducting magnetic energy storage (SMES) coil //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2010. – Т. 20. – №. 3. – С. 1379-1382.

И.С. ВОЛОХОВ^{1,2}, М.П. ТЕЛЕНКОВ^{1,2}, Ю.А. МИЯГИН¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ МЕЖУРОВНЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ В КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОКАХ С ПРОДОЛЬНЫМ ОГРАНИЧИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ

Изучено влияние межуровневого взаимодействия в квантовых проволоках с продольным ограничивающим потенциалом. На примере двухэлектронной системы в квантовой проволоке с параболическим потенциалом было выявлено, что учет матричных элементов межуровневого взаимодействия приводит к сильной гибридизации волновых функций между состояниями различных уровней, что в свою очередь приводит к существенной трансформации энергетического спектра.

I.S. VOLOKHOV^{1,2}, M.P. TELEKOV^{1,2}, Y.A. MITYAGIN¹

¹P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Technological University «MISIS»,
Moscow, Russia

INFLUENCE OF INTERLEVEL INTERACTION ON THE ELECTRON SPECTRUM IN QUANTUM WIRES WITH LONGITUDINAL CONFINING POTENTIAL

The influence of interlevel interaction in quantum wires with longitudinal confining potential is researched. On the example of a two-electron system in a quantum wire with a parabolic potential, it was found that the account of matrix elements of the interlevel interaction leads to a strong hybridization of wave functions between states of different energy levels, which in turn leads to a significant transformation of the energy spectrum.

Одним из методов генерации одиночных фотонов является последовательная рекомбинация многочастичных экситонных комплексов. Для реализации этого подхода были разработаны квантовые проволоки с ограничивающим потенциалом вдоль оси роста, создаваемым за счет градиента состава структуры [1]. Достаточно медленно изменяющийся потенциал приводит к тому, что с одной стороны получаются относительно малые энергии размерного квантования, а, с другой стороны, происходит существенная локализация носителей заряда и, как следствие, их значительное кулоновское взаимодействие. Таким образом, в подобных структурах можно ожидать эффективного возбуждения многочастичных экситонов [1].

Ранее [2] был проведен расчет многочастичного спектра носителей заряда в подобных структурах. Расчет выполнялся с использованием стационарной теории возмущений при наличии вырождения, то есть в качестве базиса рассматривались волновые функции состояний, соответствующих только одному энергетическому уровню. Было показано, что кулоновское взаимодействие между носителями заряда приводит к существенной трансформации энергетического спектра: к кулоновскому сдвигу и расщеплению уровней на триплетные и синглетные состояния вследствие обменного взаимодействия. Причем величина обоих этих эффектов существенно превышает расстояние между уровнями энергии нулевой задачи (невзаимодействующих носителей заряда).

В настоящей работе продемонстрировано, что расчет многочастичного спектра с такой точностью является довольно грубым, и что необходимо рассчитывать энергетический спектр носителей путем диагонализации полной матрицы гамильтониана, включающей матричные элементы кулоновского взаимодействия носителей заряда между различными уровнями энергии нулевой задачи.

Выполненный таким образом расчет спектра показал, что учет межуровневого взаимодействия значительно меняет структуру энергетического спектра – приводит к существенному изменению, как энергий уровней, так и порядка их следования.

Более того, межуровневое взаимодействие приводит к гибридизации волновых функций, настолько сильной, что становится невозможной классификация состояний по полному набору квантовых чисел нулевой задачи.

Список литературы

1. M. Lazarev, J. Szeszko, A. Rudra, K.F. Karlsson, E. Kapon, Parabolic tailored-potential quantum-wires grown in inverted pyramids, *J. Cryst. Growth*, 414, 196 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.11.008>.
2. Рави Кумар, М.П. Теленков, Ю.А. Митягин, Энергетическая структура мультиекситонов в квантовых проволоках с продольным ограничивающим потенциалом, *ФТП*, 57(4), 282-288 (2023). DOI: 10.21883/FTP.2023.04.55899.20k.

С.А. ВОТЯКОВ, А.В. ОСАДЧИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

НАБОР PSEUDO-SAMO СОСТОЯНИЙ В ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ

Демонстрируется существование системы состояний с максимумом электронной волновой функции в центре положительно заряженной одностенной углеродной нанотрубки (ОУН). Данные состояния в ОУН были названы pseudo-SAMO состояниями в по аналогии с SAMO-состояниями в фуллеренах. По своей форме такие системы схожи, однако в ОУН за счет их конечного размера появляется дополнительное квантование вдоль оси нанотрубки и, следовательно, дополнительное квантовое число, названное pseudo-z.

S.A. VOTYAKOV, A.V. OSADCHY
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

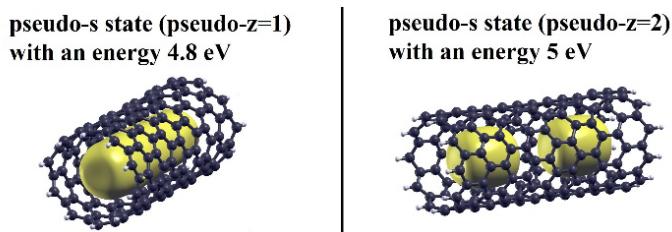
A SET OF PSEUDO-SAMO STATES IN SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES

The existence of the system of states with a maximum of the electron wave function in the center of the positively charged single-wall carbon nanotube (SWCNT) is demonstrated. These states in SWCNTs were called pseudo-SAMO states by analogy with SAMO states in fullerenes. Such systems are similar in form, but in SWCNTs, due to their finite size, additional quantization appears along the nanotube axis and, consequently, an additional quantum number, called pseudo-z.

Существование объемно-локализованных электронных состояний с максимумом электронной волновой функции в центре ОУН, названных так же pseudo-SAMO, было продемонстрировано в [1]. Причем из-за специфической локализации таких состояний и их метастабильности предполагается, что они хорошо могут себя зарекомендовать в нелинейных оптических элементах и лазерной технике. При зарядке структуры количество таких состояний должно увеличиваться в связи с наличием центрального кулоновского потенциала полойnanoструктуры. Однако ранее ни в каких работах не было продемонстрировано системы pseudo-SAMO по аналогии с системой SAMO в фуллеренах.

В данной работе демонстрируются теоретические расчеты, основанные на теории функционала электронной плотности (DFT), различных состояний с максимумом в центре одностенных углеродных нанотрубок – pseudo-SAMO-состояний. С увеличением положительного зарядков ОУН количество данных состояний возрастает. В сечение нанотрубки pseudo-SAMOs аналогичны SAMOs в фуллеренах, однако в связи с цилиндрической симметрией нанотрубки их форма вдоль оси трубы отличается от формы сферически симметричных волновых функций.

Показано, что в конечных ОУН появляется квантование pseudo-SAMOs вдоль оси z, и дополнительно для их характеристики используется квантовое число pseudo-z. Для pseudo-SAMOs общий набор квантовых чисел не повторяется: в случае инвариантности главного и орбитального квантовых чисел изменяется магнитное квантовое число (ориентация орбитали в пространстве). Для pseudo-SAMOs конечных ОУН с одинаковым главным и орбитальным квантовым числом, pseudo-z квантовое число увеличивается с ростом номера состояния.



Rис. 1. Некоторые pseudo-SAMO состояния: pseudo-s состояния для конечной ОУН типа (10,0) с различными квантовыми числами pseudo-z. Показана 3D-визуализация нанотрубки и изоповерхности квадрата волновой функции

DFT метод реализован в открытом программном обеспечении Quantum-ESPRESSO [2]. Расчеты проводились на высокопроизводительном кластерном компьютере К-100 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и Университетском кластере Национального исследовательского ядерного университета МИФИ.

Список литературы

1. Votyakov S.A., Osadchy A.V., Obraztsova E.D. // Carbon Trends 2024. Vol. 15. P. 100340.
2. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N. and others // J Phys Condens Matter 2009. Vol. 21, № 39. P. 395502.

В.И. ГЕРАСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, В.А. КАШУРНИКОВ

Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАСЧЕТ КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Методом Монте-Карло для вихревой системы в слоистом анизотропном ВТСП выполнен расчет намагниченности образца с разным числом дефектов. Реализован параллельный алгоритм и исследовано влияние количества используемых потоков на время и погрешность расчета, определена оптимальная схема распараллеливания. Рассмотрено влияние концентрации дефектов на положение оптимума.

V.I. GERASIMOVA, A.N. MOROZ, A.N. MAKSIMOVA, V.A. KASHURNIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CALCULATION OF THE MAGNETIZATION CURVE OF A HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR USING PARALLEL PROGRAMMING TECHNOLOGIES

The Monte Carlo method for a vortex system in a layered anisotropic HTS was used to calculate the magnetization of a sample with different numbers of defects. A parallel algorithm was implemented and the effect of the number of threads used on the calculation time and error was studied, and an optimal parallelization scheme was determined. The effect of defect concentration on the optimum position was considered.

Вихревая решетка в современных высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) представляет собой физически сложную и разнообразную систему, не поддающуюся строгому аналитическому описанию. Для ее исследования часто применяются численные методы моделирования, однако ввиду высокой вычислительной сложности, обусловленной высокой плотностью вихрей и необходимостью учета большого количества взаимодействий, расчет может занимать продолжительное время или оказывается ограниченным малыми размерами образца или узкими диапазонами моделируемых параметров. В связи с этим возникает необходимость совершенствования существующих алгоритмов и реализации параллельных вычислений для получения более точных результатов для образцов и условий, приближенных к реализуемым в эксперименте.

В настоящей работе на языке C++ реализован численный алгоритм Монте-Карло [1] для расчета кривых перемагничивания образцов ВТСП с разными концентрациями дефектов (рис. 1 слева). Для распараллеливания подсчета гиббсовского потенциала вихревой системы применен стандарт OpenMP. Получены зависимости времени расчета от количества используемых потоков (рис. 1 справа), определены оптимальные параметры расчета для каждого образца. Наличие минимума зависимости и резкого роста времени расчета с дальнейшим увеличением числа потоков может быть объяснено особенностями использованного компилятора MSVC, а также особенностями параллельного программирования, такими как false sharing, и спецификацией его использования внутри расчетного кода.

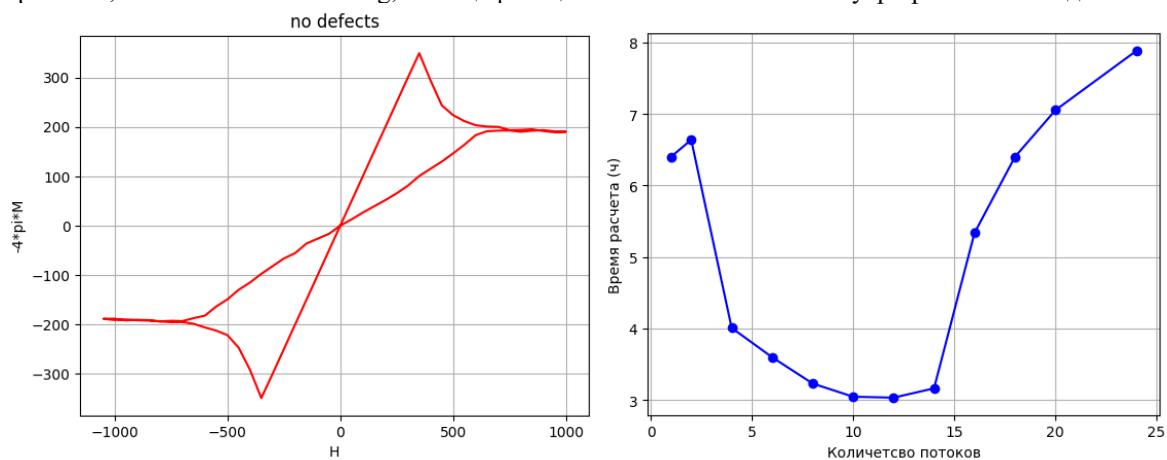


Рис. 1. Кривая намагниченности слоистого анизотропного сверхпроводника без дефектов (слева); Зависимость времени выполнения расчета кривой в часах от числа используемых потоков (справа).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. Moroz A. and others // J. Supercond. Nov. Magn. 2024. Vol. 37. №. 2. P. 339-353.

А.В. ГЛИНСКИЙ, А.В. НЕХОРОШЕВ, Х.М. КОЗЫРЕВ, А.Л. ГОНЧАРОВ, А.А. БЕЗБЕРДА.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

ДВУХПРОВОЛОЧНОЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ АДДИТИВНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Описан способ получения градиентного материала методом двухпроводового электронно-лучевого аддитивного формообразования. Исследовано влияние градиента химического состава на диффузионные процессы в материале. Установлено, что снижение градиента замедляет диффузию углерода.

A.V. GLINSKY, A.V. NEKHOROSHEV, H.M. KOZYREV, A.L. GONCHAROV, A.A. BEZBERDA

National Research University "MPEI" (Moscow Power Engineering Institute), Moscow, Russia

TWO-WIRE ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING OF GRADIENT MATERIALS FOR SLOWING DOWN DIFFUSION PROCESSES

A method for obtaining gradient material by the method of two-wire electron beam additive molding is described. The influence of the chemical composition gradient on the diffusion processes in the material is investigated. It has been found that a decrease in the gradient slows down the diffusion of carbon.

Для снижения себестоимости металлических деталей в энергетике часто используют соединения разнородных материалов, например, лопатки паровых турбин из мартенситной стали с накладками из стеллита для повышения эрозионной стойкости. Такие соединения имеют недостатки: стеллитовые пластины могут откалываться из-за различия коэффициентов теплового расширения. В разнородных соединениях трубопровода образуются диффузионные прослойки, ухудшающие свойства конструкции. Градиентные материалы (ГМ) позволяют решить эти проблемы благодаря плавному изменению химического состава в объеме [1].

Исследование направлено на изучение твёрдости и микроструктуры образцов, созданных методом двухпроводового электронно-лучевого аддитивного формообразования (ЭЛАФ). В работе будет оценено влияние плавного изменения химического состава (градиентного перехода) на диффузионные процессы.

Для получения образцов был разработан механизм подачи двух проволок, который был установлен на электронно-лучевой комплекс, состоящий из вакуумной камеры, электронно-лучевой пушки и координатного стола.

Методом ЭЛАФ были выращены образцы в виде стенок из аустенитной и перлитной проволок 12X25H12 и 40Х. Стенка 1 толщиной 12,5 мм имела резкий переход от стали 40Х к стали 12X25H12. Стенка 2 имела толщину 5 мм и состояла из однородных участков, аналогичных стенке 1: в нижней части — из стали 40Х, а в верхней — из стали 12X25H12, соединенных градиентным переходом высотой 30 мм, который был реализован за счёт варьирования скорости подачи двух проволок, что позволило получить различный по высоте химический состав, плавно изменяющийся от одной стали к другой. Полученные стенки были разрезаны на темпилеты, которые подвергли выдержке в печи при температуре 650 °C в течение 10 часов. После термообработки был проведён анализ изменения структуры и твёрдости на границе сплавления.

Анализ распределения твёрдости после наплавки показал, что максимальное значение твёрдости в стенке 1 составило 425 HV₅, а в стенке 2 — 575 HV₅. В области, выполненной из 40Х, твёрдость внутри зерна составляла 500 HV_{0,3}, а на границе зерен — 300 HV_{0,3}. В верхних областях стенок твёрдость составляла 165 HV₅. После термической обработки анизотропия твёрдости в однородных областях снизилась. Сравнение макроструктуры границы сплавления показало наличие тёмной линии на границе. В стенке 1 анализ твёрдости продемонстрировал, что термическая обработка привела к росту твёрдости на линии до значения 350 HV_{0,3}, при этом ниже и выше этой линии твёрдость не превышала 277 HV_{0,3}. В стенке 2 на границе сплавления градиентного перехода с однородной областью из 40Х не было обнаружено скачков твердости.

Сравнение твёрдости до и после термической обработки показало, что в более толстой стенке (1) наблюдаются пониженные значения твёрдости, что свидетельствует о меньшем количестве закалочных структур. Таким образом, увеличение толщины конструкции способствует уменьшению доли закалочных структур за счет более медленного охлаждения. Рост пиков твёрдости, обусловлен диффузией углерода, который привёл к формированию карбидной прослойки. Отсутствие пика твёрдости во второй стенке подтверждает, что ГМ замедляет диффузионные процессы.

Результаты исследования демонстрируют, что использование градиентного перехода позволяет устраниć недостатки, характерные для разнородных соединений, которые связаны с диффузией. В дальнейшей работе планируется создать градиентное соединение стали и стеллита, чтобы подтвердить, что такой подход увеличит длительную прочность конструкций по сравнению с традиционными соединениями этих материалов.

Работа выполнена в НИУ «МЭИ» при выполнении НИОКР в рамках ПНИ «Приоритет 2030: Технологии будущего» на период 2024/26 гг., № ПНИ-24/26 - 35 от 01.11.2024 г.

Список литературы

1. A Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications / R. Singh, V. Bhavar, P. Kattire [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 229. – № 1.

М.Д. ГРИЦКЕВИЧ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, Д.В. ФОМИНСКИЙ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОПОКРЫТИЙ $\text{MoS}_x/\text{a-C(S,H)}$ СО СТАЛЬНЫМ КОНТРТЕЛОМ ПРИ ТРЕНИИ

Исследованы трибохарактеристики многослойных нанопокрытий, полученных методом реакционного импульсного лазерного осаждения за счёт поочередного осаждения слоёв из мишеней Молибдена и стеклоуглерода в сероводороде на стальные подложки. Определен коэффициент трения полученных покрытий, а также уровень и характер износа при испытаниях в сухом воздухе при комнатной температуре. Выявлена направленность трибо-индущированных структурных изменений в поверхностных слоях покрытий.

M.D. GRITSKEVICH, V.YU. FOMINSKI, R.I. ROMANOV, D.V. FOMINSKI
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CONTACT INTERACTION OF $\text{MoS}_x/\text{a-C(S-H)}$ NANOCOATINGS WITH A STEEL COUNTER RBODY DURING FRICTION

Tribocharacteristics of multilayer nanocoating containing MoS_x and a-C(S-H) phases and obtained by the method of reactive pulsed laser deposition due to alternate deposition of layers of Mo and glassy carbon targets in hydrogen sulfide onto steel substrates are studied. The coefficient of friction of the obtained coatings was evaluated, as well as the level and nature of wear during tests in dry air at room temperature. Tribo-induced structure modification was studied.

Достижение, а главное, сохранения низкого коэффициента трения и слабого износа в процессе контактного взаимодействия деталей в парах трения высокотехнологичного оборудования, является серьёзной производственной задачей. Нанесение композитных или многослойных антифрикционных нанопокрытий на поверхность детали позволяет увеличить срок службы изделия посредством особой комбинации твердосмазочных слоёв фаз MoS_x и a-C(S-H) . В работе представлены результаты трибоиспытаний многослойных покрытий, а также рассмотрены факторы, влияющие на достижение низкого коэффициента трения и слабого износа покрытий при испытаниях в сухом воздухе (относительная влажность 8%).

Давление реакционного газа и время абляции мишеней позволило сформировать покрытия с пониженным коэффициентом трения и низким износом покрытий в процессе трибоиспытаний в режиме возвратно-поступательного скольжения стального шарика диаметром 6 мм при нагрузке 1 Н, со скоростью 2 см/с. Трибохарактеристики полученных покрытий могли быть обусловлены концентрацией фазы c-MoS_2 , а также относительно слабой графитацией углероднойnanoфазы.

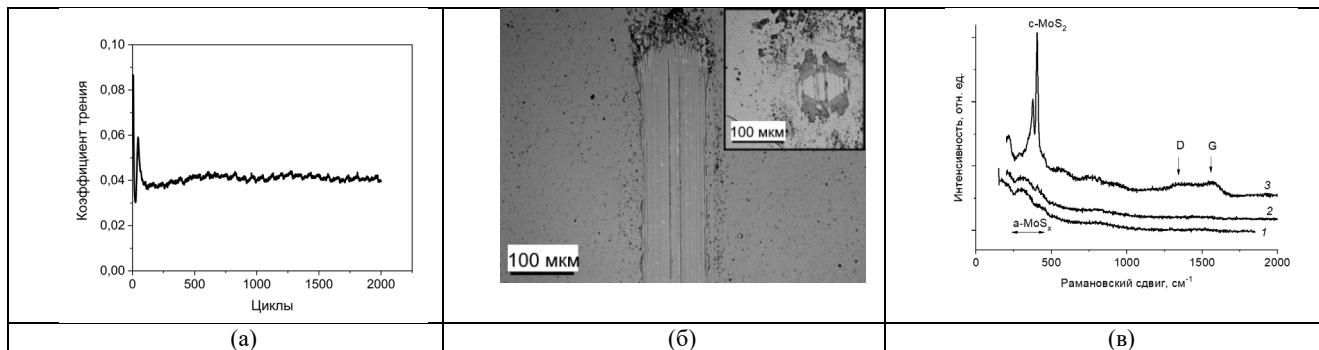


Рис. 1. (а) Зависимость среднего коэффициента трения от числа циклов скольжения контртела в сухом воздухе по многослойному покрытию; (б) микроизображения треков износа и контртела (на вставках) после трибоиспытания этих покрытий; (в) микрорамановские спектры, измеренные до (1) и после триботестиирования в сухом воздухе в центре трека износа (2) и для частиц износа (3).

Данные, приведенные на рисунке 1, показывают, что многослойное покрытие, полученное при давлении $\text{H}_2\text{S} \sim 8$ Па, толщиной 0,5 мкм, обладало низким и устойчивым значением коэффициента трения ~ 0.04 , которое установилось после приработки (менее 500 циклов). Исследования покрытий методом микрорамановой спектроскопии показали, что трибо-воздействие обуславливало образование nanoфазы c-MoS_2 графитацию углеродной nanoфазы в многослойном покрытии.

К.С. ГРИШАКОВ, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КЛАСТЕРЫ АЗИДОФУЛЛЕРНОВ И АЗОТНО-УГЛЕРОДНЫЕ ГЕТЕРОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

В рамках теории функционала плотности предсказана возможность создания нового класса устойчивых кластерных веществ – азидофуллеренов, запасающих энергию, на основе существующих в природе прекурсоров – углеродных фуллеренов и присоединенных к ним азидов N_3 . Рассмотрена возможность получения за счет сжатия вещества, состоящего из молекул азидофуллеренов, твердой гетерогенной фазы, способной запасать энергию и устойчивой в области давлений, близких к нормальному.

K.S. GRISHAKOV, N.N. DEGTYARENKO

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CLUSTERS OF AZIDOFULLERENES AND NITROGEN-CARBON HETEROGENEOUS STRUCTURES BASED ON THEM

Within the framework of the density functional theory, the possibility of creating a new class of stable clusters storing energy – azidofullerenes, based on naturally occurring precursors – carbon fullerenes and azides N_3 attached to them, is predicted. The possibility of obtaining a solid heterogeneous phase capable of storing energy and stable at pressures close to normal by compression a substance consisting of azidofullerene molecules is investigated.

Создание материалов с высокой плотностью запасаемой энергии (HEDM, от англ. high energy density material) является актуальной и практически значимой задачей. Кристаллические структуры, состоящие из атомов азота с одинарными и/или двойными связями, являются одними из перспективных кандидатов на роль HEDM. Однако к настоящему моменту экспериментально подобные структуры удавалось получить только при высоком давлении (> 120 ГПа), с сохранением их устойчивости при понижении давления до ~ 50 ГПа [1]. Наряду с экспериментальными работами проводились и активные теоретические исследования. В работе [2] за счет применения оригинального подхода, основанного на моделировании процесса адиабатического сжатия азотных кластеров, удалось предсказать ряд новых твердых атомарных азотных структур, в том числе динамически устойчивых при атмосферном давлении, а также детально описать их свойства. В работе [3] была предсказана азотная фаза с необычными для подобных структур полуметаллическими электронными свойствами. Однако более детальные теоретические исследования показали, что при нормальном давлении известные к настоящему моменту структуры оказываются неустойчивыми к формированию вакансий, либо обладают неустойчивой поверхностью [4]. В связи с этим более актуальным является поиск не чисто азотных атомарных кристаллических структур, а новых материалов с высоким содержанием азота, содержащих один или несколько атомов другого сорта.

В данной работе в рамках метода теории функционала плотности предсказана возможность существования азидофуллеренов. Данные структуры содержат углеродные фуллерены, к поверхности которых присоединено определенное число азидов N_3 . Азотные цепочки N_3 способны при распаде на молекулы азота выделять энергию. Найдены наиболее энергетически выгодные их конфигурации, электронные и колебательные спектры. Показана динамическая устойчивость этих кластеров.

На основе предсказанных структур азидофуллеренов были построены периодические системы, и проведено моделирование их сжатия при нулевой температуре, которое привело к образованию твердых гетерогенных фаз. Структура получившегося твердого вещества содержит элементы цепочек атомов азота со связями первого и второго порядка длиной до 6 атомов, соединяющих углеродные фуллерены. Величина критического давления, необходимого для формирования твердой фазы, определяется исходным составом и конфигурацией до начала сжатия, и находится в диапазоне 75–115 ГПа, что более, чем в 2 раза меньше давления, необходимого для преобразования молекулярного азота в полимерный при холодном сжатии.

При декомпрессии этого гетерогенного вещества наблюдается гистерезис зависимости удельного объема от давления. Твердотельные структуры, полученные при сжатии, сохраняют динамическую устойчивость в области давлений близких к нормальному. Элементы этих структур в виде цепочек атомарного азота являются энерго-запасающим компонентом, распад которого на молекулы азота приводит к значительному выделению энергии с возрастанием температуры системы до 3000К. Для определенных конфигураций углеродные кластеры практически не распадаются, т.е. не участвуют в реакции распада, а только нагреваются.

Список литературы

1. M. I. Eremets, A. G. Gavriliuk, I. A. Trojan, D. A. Dzivenko, R. Boehler // Nature Materials. 2004. Vol. 3. P. 558.
2. K. S. Grishakov, N. N. Degtyarenko // Physical Chemistry Chemical Physics. 2022. Vol. 24. P. 8351–8360.
3. K. S. Grishakov, N. N. Degtyarenko // Jett. Lett. 2020. Vol. 112. P. 630–635.
4. K. S. Grishakov, N. N. Degtyarenko // Jett. Lett. 2023. Vol. 117. P. 669–675.

К.С. ГРИШАКОВ, А.Д. МУСТАФИН, И.С. ВАСИЛЬЕВСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ ПРИ НАЛИЧИИ МЕХАНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ НАНОВСТАВОК

Получены результаты теоретических расчетов зависимостей изменения показателя преломления и коэффициента поглощения от электрического поля в структурах с квантовыми ямами на основе AlGaInAs. Рассмотрен случай наличия в квантовой яме механически напряженных нановставок InAs и GaAs, для которого продемонстрировано существенное увеличение электрооптического эффекта.

K.S. GRISHAKOV, A.D. MUSTAFIN, I.S. VASIL'EVSKII

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ELECTRO-OPTICAL EFFECT IN QUANTUM WELLS IN THE PRESENCE OF MECHANICALLY STRAINED NANOINSERTS

As a result of numerical calculations, dependences of the change in the refractive index and absorption coefficient on the electric field in structures with quantum wells based on AlGaInAs were obtained. A significant increase in the electro-optical effect due to the introduction of mechanically strained InAs and GaAs nanoinserts into the structure was demonstrated.

Основным элементом современной интегральной радиофотоники является электрооптический модулятор, который позволяет записывать информацию на несущий световой сигнал. Принцип работы такого модулятора основан на изменении свойств среды, по которой распространяется световой сигнал, под действием электрического поля. Модуляторы на основе соединений AlGaInAs содержат активную область, образованную квантовыми ямами, и используют квантово-размерный эффект Штарка для изменения показателя преломления под действием электрического поля. Рабочая длина волны при этом находится за краем поглощения. Таким образом обеспечивается фазовая модуляция входного светового сигнала, которая преобразуется в амплитудную за счет использования интерферометрической схемы Маха-Цендера. Основная задача состоит в увеличении электрооптического эффекта, т.е. в достижении как можно большего изменения показателя преломления под действием как можно меньшего электрического поля на стандартной для интегральной радиофотоники рабочей длине волны порядка 1.55 мкм, соответствующей одному из окон прозрачности оптического волокна.

Обычно при теоретических расчетах электрооптического эффекта в структурах с квантовыми ямами используется вариационный принцип для нахождения энергий переходов между валентной зоной и зоной проводимости с учетом экситонных эффектов [1]. Однако такой подход оказывается весьма неточным. Известно, что он завышает силу осциллятора экситонного перехода для 1s связанных состояний примерно на 20% и на 50% для сплошного спектра [2], а также не дает правильного предельного перехода для энергии связи экситона при стремлении толщины квантовой ямы к бесконечности, что соответствует случаю объемного полупроводника. Нами показано, что данный подход также «искажает» и зависимость изменения показателя преломления от электрического поля.

В данной работе для исследования электрооптического эффекта в структурах с квантовыми ямами нами использовано численное решение интегрального уравнения для энергии и волновых функций экситона в импульсном пространстве [3]. Для нахождения энергий и волновых функций дырок используется численное решение 4x4 кр-Гамильтониана Латтингера-Кона, которое позволяет учесть эффекты сильного смешивания состояний в валентной зоне и соответствующее отклонение от параболического закона дисперсии, присущее структурам с квантовыми ямами.

В работе рассмотрен новый класс структур, для которых ранее электрооптический эффект не исследовался. Это структуры с квантовыми ямами, в которые вводятся напряженные нановставки GaAs и InAs. Причина рассмотрения подобных структур заключается в том, что подобные механически напряженные нановставки оказывают сильное влияние на энергии и волновые функции электронов и в особенности дырок, в том числе возможно раздельное управление состояниями легких и тяжелых дырок за счет варьирования толщины и положения нановставок в квантовой яме [4]. Проведено сопоставление рассчитанного электрооптического эффекта в структурах с квантовыми ямами при наличии и отсутствии нановставок. Показано, что введение напряженных нановставок GaAs и InAs в структуры с квантовыми ямами на основе соединений AlGaInAs приводит к увеличению электрооптического эффекта.

Список литературы

1. Zolotarev V.V., Shashkin I.S., Golovin V.S. and others // Semicond. Sci. Technol. 2019. Vol. 34, P. 095005.
2. Chuang S.L., Schmitt-Rink S., Miller D.A.B. and Chemla D.S. // Phys. Rev. B. 1991. Vol. 43. P. 1500.
3. Chao C.Y. and Chuang S.L. // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 48. P. 8210.
4. Ponomarev D.S., Vasil'evskii I.S., Galiev G.B. and others // Semiconductors. 2012. Vol. 46. P. 484–490.

Г.И. ЗЕБРЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАДИАЦИОННЫЙ ШУМ КОСМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И СТАТИСТИКА МНОЖЕСТВЕННЫХ СБОЕВ В ЦИФРОВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Обсуждаются физические и практические аспекты возрастающей роли стохастических одиночных сбоев в цифровой электронике при воздействии отдельных ионизирующих частиц космического пространства, обусловленных постоянным снижением помехоустойчивости цифровых элементов в процессе их миниатюризации.

G.I. ZEBREV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SPACE RADIATION NOISE AND MULTIPLE CELL UPSET STATISTICS IN DIGITAL NANOELECTRONICS

The physical and practical aspects of the increasing role of stochastic single event upsets in digital electronics under the influence of individual ionizing particles of outer space, caused by the constant decrease in the noise immunity of digital elements in the process of their miniaturization, are discussed.

При миниатюризации элементов современной цифровой наноэлектроники их запас помехоустойчивости к внешним помехам, в т.ч., к воздействию отдельных ионизирующих частиц космического пространства (т.н. одиночные сбои, SEU), катастрофически уменьшается. Эта технологическая проблема в значительной степени носит фундаментальный характер в силу неустранимости внешнего фактора и слабой зависимости от используемых материалов и от физических механизмов работы цифровых элементов. В частности, из-за нелокальности воздействия ионизирующей частицы возникает эффект множественных сбоев (MCU), имеющих стохастическое распределение событий по кратности, что крайне затрудняет использование стандартных алгоритмов коррекции ошибок.

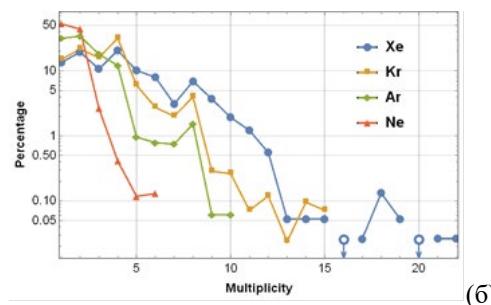
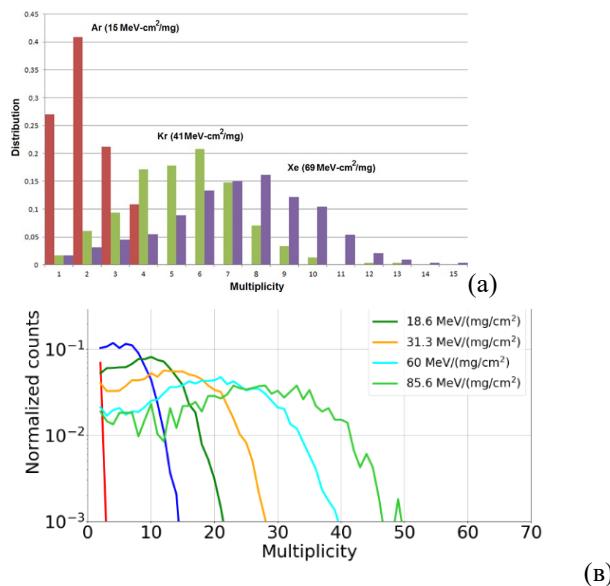


Рис. 1. Экспериментальные распределения сбоев по

кратности:

- (а) «пуассоновское» [1];
(б) экспоненциальное («тепловое») распределение [2];
(в) смесь двух типов распределений (данные CERN [3]).

Множественность сбоев предполагает почти полное отсутствие влияния конкретных механизмов сбоев и внутренних корреляций и необходимость статистического описания, где роль температуры играет среднее энерговыделение одиночного события. Анализ стандартным методом максимизации энтропии показывает, что распределение по кратностям в этом случае должно быть экспоненциальным, а средняя кратность сбоев соответствуют распределению Бозе-Эйнштейна, что хорошо соответствует эксперименту (Рис. 1б). Однако первоначальные данные были больше похожи на пуассоновские («когерентное») распределение кратностей (Рис. 1а). Последние данные выглядят как смесь «теплового» и «когерентного» типа распределения (Рис. 1в). В докладе предполагается обсудить теоретические и практические аспекты данной проблемы.

Список литературы

1. Zebrev G.I., et al. Statistics and methodology of multiple cell upset characterization under heavy ion irradiation// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 775 (2015) 41–45 doi: 10.1016/j.nima.2014.11.106.
2. Galimov A. M. et al., 2020 //doi: 10.1109/RADECS50773.2020.9857709.
3. Coronetti A. et al., 2024//IEEE Trans. Nucl. Sci., doi: 10.1109/TNS.2024.3487647.

Г.В. ИСУПОВ, П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ КИНЕТИКИ РЕЛАКСАЦИИ В СВЕРХПРОВОДНИКЕ С УЧЕТОМ НЕРАВНОВЕСНЫХ ФОНОНОВ

Решается задача о детальном численном моделировании кинетики в ВТСП после оптического возбуждения с учётом неравновесных фононов. Обсуждаются основные теоретические подходы, использующие уравнения Больцмана, Лиувилля и Лин dblада, приводятся результаты моделирования и даётся сравнительный анализ ограничений данных подходов.

G.V. ISUPOV, P.F. KARTSEV, I.O. KUZNETSOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO NUMERICAL SIMULATION OF RELAXATION KINETICS IN SUPERCONDUCTOR TAKING INTO ACCOUNT NONEQUILIBRIUM PHONONS

The detailed simulation of relaxation kinetics in HTS after optical excitation when taking into account nonequilibrium phonons is studied. Main existing theoretical approaches based on Boltzmann, Liouville and Lindblad equations, are analysed. The results of numerical simulation are presented, and restrictions of the approaches are discussed.

Современные методы исследования сверхпроводящих материалов включают в себя методику «накачка-зондирование» (pump-probe), где исследуется реакция электронной подсистемы на ультракороткий лазерный импульс и её релаксация с течением времени [1,2]. Анализ времен релаксации позволяет уточнить детали взаимодействия между частицами и сформулировать теоретические модели, описывающие новые ВТСП материалы.

Хорошо известны т.н. двухтемпературная модель и модель Ротварфа-Тейлора [3], использующие для описания релаксации в сверхпроводнике интегральные характеристики электронной и фононной подсистем – их концентрацию и температуру. Однако для достаточно коротких масштабов времени эти модели неприменимы, так как необходимо учитывать особенности распределения частиц по импульсам. Поэтому для корректного моделирования поведения возбужденного состояния в сверхпроводнике требуется использовать детальные теоретические модели и эффективные численные схемы [4].

В данной работе представлен анализ теоретических подходов к описанию кинетики неравновесного состояния в сверхпроводнике, таких как уравнение Больцмана [5] и уравнение Лиувилля [6]. Обсуждаются основные ограничения данных моделей. Используется модель электронов на узлах кристаллической решётки и в варианте среднего поля Боголюбова-де Жена, что позволяет учесть как s-, так d-волновую симметрию параметра порядка при помощи соответствующего выбора параметров взаимодействия. Приводятся результаты численного моделирования.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект государственного задания FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. V.V. Kabanov, J. Demsar and D. Mihailovic, Kinetics of a superconductor excited with a femtosecond optical pulse // Phys. Rev. Lett. 95, 147002 (2005).
2. Yao Wang et al., Light-Enhanced Spin Fluctuations and d-Wave Superconductivity at a Phase Boundary // Phys. Rev. Lett. 120, 246402 (2018).
3. A. Rothwarf and B. N. Taylor, Measurement of recombination lifetimes in superconductors // Phys. Rev. Lett. 19, 27 (1967).
4. I. O. Kuznetsov and P. F. Kartsev, Method and computer library for calculation of the Boltzmann collision integrals on discrete momentum lattice // Phys. Rev. E 107, 055304 (2023).
5. P.F. Kartsev and I.O. Kuznetsov, Effect of transport current on suppression of superconductivity with ultrashort laser pulse // J. Phys.: Condens. Matter 33, 295601 (2021).
6. R.C. Iotti and F. Rossi, Energy Dissipation and Decoherence in Solid-State Quantum Devices: Markovian versus non-Markovian Treatments // Entropy 22, 489 (2020).

А.А. КАЗЬМИН

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ СОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦЫ

Представлены результаты трибологических исследований композиционных гальванических покрытий, полученных путем электроосаждения меди из электролитов модифицированных наночастицами, синтезированных в плазме электровзрывного разряда в дистиллированной воде. Показано, что адгезионная стойкость и износостойкость покрытий с введением в электролит наночастиц возрастают.

A.A. KAZMIN

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GALVANIC COATINGS CONTAINING NANOPARTICLES

The results of tribological studies of composite galvanic coatings obtained by electrodeposition of copper from electrolytes modified with nanoparticles obtained in the plasma of an electric explosive discharge in distilled water are presented. It is shown that the adhesive resistance and wear resistance of the coatings increase with the introduction of nanoparticles into the electrolyte.

Для улучшения физико-механических свойств поверхностей изделий широко используют их покрытие слоем материала с более высокими эксплуатационными свойствами. Широкое распространение получили гальванические покрытия, получаемые электроосаждением металлов из солей электролитов [1]. Для улучшения свойств гальванических покрытий в них включаются наночастицы, т.е. получаются композиционные покрытия. Введение наночастиц в электролиты приводит к структурированию осаждаемого металла и повышению свойств самих покрытий [2,3]. Для приготовления водных электролитов солей металлов, содержащих наночастицы, используются наносуспензии на водной основе. Перспективным методом их получения является электровзрывной разряд в воде [4]. Для электровзрывного диспергирования медных проводников в дистиллированной воде была создана установка, выходные параметры которой рассчитывались по методике [5,6], аналогично системам возбуждения эксимерных лазеров и ламп [7,8]. Полученные наносуспензии использовались для приготовления модифицированных электролитов и формирования из них электроосаждением композиционных покрытий. Трибологические исследования проводились на микротрибометре FT-2 в схеме неподвижный исследуемый образец – подвижный индентор.

На покрытиях, полученных при использовании типового электролита, коэффициент трения находился в диапазоне 0,2-0,22 и практически не зависел от времени осаждения покрытия. При малых (до 20 минут) временах осаждения покрытий наличие в их составе наночастиц меди на триботехнические характеристики значительного влияния не оказывало. Прослеживается слабое увеличение коэффициента трения. Трибологические исследования покрытий полученных из электролитов содержащих наночастицы меди при больших временах осаждения показывают рост коэффициента трения до 0,27 при времени осаждения 40 минут и до 0,29 при времени осаждения 60 минут. Наблюдения покрытий в микроскоп показывают, что они образованы плотно упакованными сфероподобными структурами размерами в несколько микрон. Это приводит к увеличению шероховатости поверхности покрытия на микроуровне и росту коэффициента трения. Введение в электролит наночастиц приводило к формированию мелкозернистого покрытия с большей упорядоченностью кристаллической структуры и с большей твердостью.

Исследования износостойкости полученных покрытий показывает ее рост с ростом концентрации наночастиц в электролите и ростом времени осаждения. Покрытия, полученные из типового электролита, во время испытаний на микротрибометре подвергались разрушению. Они отделялись от поверхности подложки. На покрытиях, полученные из модифицированных наночастицами электролитов, наблюдались задиры, отделения мелких сегментов. Исследования на полное истирание полученных композиционных покрытий показывают, что их износостойкость зависит от концентрации наночастиц в электролите. Время полного разрушения покрытий полученных из модифицированных наночастицами электролитов превышало время полного разрушения покрытий, полученных из типового электролита, в 2 и более раз. Таким образом, характер и последствия разрушений композиционных покрытий говорят о том, что их адгезионная стойкость с введением в электролит наночастиц возрастает.

Список литературы

1. Гамбург Ю.Д. // Гальванические покрытия. Технологии, характеристики, применения. Долгопрудный, 2018. 230 с.
2. Буркат Г.К. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 72–78.
3. Тырышкина Л.Е., Чиганова Г.А. Наноструктурированные материалы и функциональные покрытия. 2014. № 2. С. 54–58.
4. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ ім Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., вyllіч. тэхн. і кір.. 2024. Т. 14, № 1. С. 81–92.
5. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., [Losev V. F.](#), Znosko K.F. // [RussianPhysics Journal](#). 2012. [V. 54, № 11](#). P. 1264-1271.
6. Белаш В.Ч., Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ ім Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., вyllіч. тэхн. і кір.. 2018. Т. 8, № 3. С. 83–92.
7. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. // [Journal of Optical Technology](#). 2000. V. 67, № [11](#). P. 961-967.
8. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ ім Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. 2019. Т.9, № 2. С. 81–91.

А.А. КАЗЬМИН, А.В. ЗЕЛЕНКО
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

МЕДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ СОДЕРЖАЩИЕ НАНОЧАСТИЦЫ

Представлены результаты электроосаждения меди из электролитов модифицированных наночастицами полученными в плазме электровзрывного разряда в дистиллированной воде. Показано, что наночастицы служат центрами кристаллизации для атомов меди на поверхности подложки. При совместном электроосаждении наночастиц с атомами меди на поверхности подложки образуется гальваническое покрытие с плотно упакованной мелкоизделической структурой.

A.A. KAZMIN, A.V. ZELIANKO
Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

COPPER COMPOSITE GALVANIC COATINGS CONTAINING NANOPARTICLES

The results of copper electrodeposition from electrolytes modified with nanoparticles obtained in the plasma of an electric explosive discharge in distilled water are presented. It is shown that the nanoparticles serve as crystallization centers for copper atoms on the substrate surface. When nanoparticles are electrodeposited together with copper atoms, a galvanic coating with a densely packed fine-crystalline structure is formed on the substrate surface.

В настоящее время наночастицы широко применяются в науке, технике, производстве, в том числе для модификации поверхностных покрытий [1,2]. Перспективными методами получения наночастиц в наносусpenзиях являются лазерная абляция [3] и электровзрывной разряд [4] в жидких средах. Используемые в экспериментах наносусpenзии получались путем электровзрывного диспергирования медных проволочек в дистиллированной воде. Для этого по аналогии с системами возбуждения электроразрядных лазеров [5] и ламп [6] была создана установка. Ее выходные параметры предварительно моделировались по методике [7] с учетом [8]. Были получены наносусpenзии красновато-пурпурного оттенка со значительно сниженным светопропусканием. Они использовались для приготовления модифицированного наночастицами электролита на основе медного купороса.

Медные гальванические покрытия получались на подложке в электролитической ячейке. На рис. 1 представлены микрофотографии покрытий, полученных в отраженном свете ($100\text{мкм} \times 100\text{мкм}$). Анализ изображений покрытий, полученных из типового электролита, показывает, что их образование происходило неравномерно. Они имеют различную толщину, наблюдаются разноразмерные очаги омеднения, видны хаотично расположенные уступы. Использование электролита модифицированного наночастицами приводит к тому, что впадин, уступов и других неравномерностей покрытий существенно меньше. Анализ их микрофотографий показывает, что наличие наночастиц в электролите приводит к образованию структурированных покрытий без видимых дефектов. Структура покрытий зависит от концентрации наночастиц в электролите. Чем больше их концентрация, тем однороднее покрытие. Равномерное расположение очагов омеднения, обусловлено тем, что наночастицы, присутствующие в электролите, являются центрами очагов омеднения, на которые впоследствии осаждаются атомы меди.

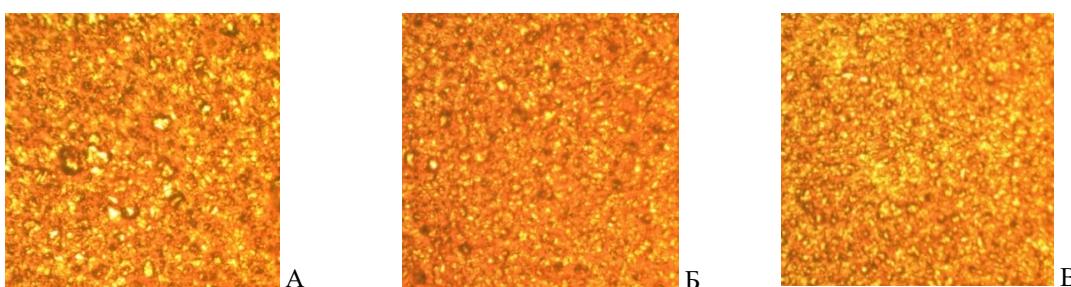


Рис. 1. Микрофотографии покрытий осажденных из типового (А) и модифицированных наночастицами (Б, В) электролитов

Список литературы

1. Макаров Г.Н. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 673–718.
2. Фомина Р.Е., Мингазова Г.Г., Сайфуллин Р.С. и др. // Вестник Казан.технол. ун-та. 2010. № 5. С. 136–141.
3. Лещик С.Д., Знаско К.Ф., Сергиенко И.Г. и др. // Фундамент.пробл.радиоэлектрон.приборостр. 2014. Т.14, №2. С.84-87.
4. Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С. // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 5. С.81–87.
5. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. // **Journal of Optical Technology**. 2000. V. 67, № 11. P. 961-967.
6. Знаско К.Ф. // Веснік ГрДУ ім Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. 2019. Т.9, № 2. С. 81–91.
7. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., [Losev V.F.](#), Znosko K.F. // [Russian Physics Journal](#). 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.
8. Белаш В.Ч., Знаско К.Ф. // Веснік ГрДУ ім Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., виліч. тэхн. ікір.. 2018. Т. 8, № 3. С. 83–92.

А.В. КАЛАШНИКОВ, М.А. ТОМАЕВА, А.В. КРАСАВИН, В.Д. НЕВЕРОВ

Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СМЕШАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКА В РАМКАХ ПРИБЛИЖЕНИЯ БОГОЛЮБОВА-ДЕ ЖЕНА

Численно решены уравнения Боголюбова-де Жена на квадратной решётке для сверхпроводника во внешнем магнитном поле. Получена фазовая диаграмма сверхпроводящего состояния в координатах «эффективный потенциал притяжения электронов – температура».

A.V. KALASHNIKOV, M.A. TOMAEVA, A.V. KRASAVIN, V.D. NEVEROV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE SUPERCONDUCTOR INTERMEDIATE MIXED STATE IN THE FRAMEWORK OF THE BOGOLIUBOV-DE GENNES APPROXIMATION

The Bogoliubov-de Gennes equations on a square lattice are solved numerically for a superconductor in an external magnetic field. A phase diagram of the superconducting state is obtained in the coordinates "effective electron attraction potential – temperature".

Исследование отклика сверхпроводника на магнитное поле является актуальной задачей физики сверхпроводников, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение. В данной работе исследуется зависимость типа сверхпроводимости от температуры T и величины взаимодействия электронов U (рис. 1). Для этого численно решаются уравнения Боголюбова-де Жена на квадратной решётке для сверхпроводника во внешнем магнитном поле. Обнаружена область, где конфигурация вихрей отлична от правильной треугольной решётки, что отвечает промежуточному смешанному состоянию. Такое экзотическое поведение объясняется немонотонным взаимодействием между вихрями, которое является результатом конкуренции нормальной и сверхпроводящей областей [1].

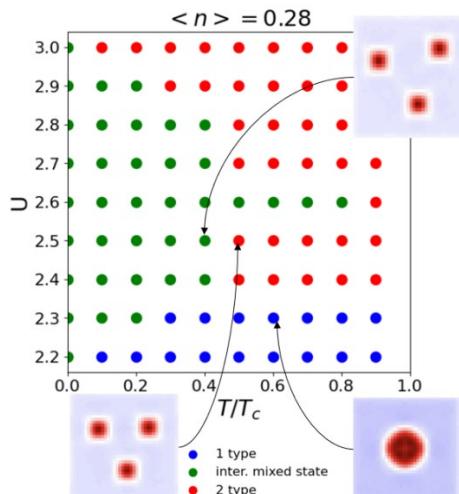


Рис. 1. Фазовая диаграмма сверхпроводящего состояния в координатах «эффективное взаимодействие электронов U -приведённая температура T/T_c » для фиксированного заполнения $\langle n \rangle$. Врезка конфигурации вихрей Абрикосова в 1, 2 типе и в промежуточном смешанном состоянии.

Список литературы

1. E.H. Brandt and M.P. Das, «Attractive vortex interaction and the intermediate-mixed state of superconductors», J. Supercond. Novel Magn. **24**, 57 (2011).

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Д. ЧЕРТОВА, А. ЗАЧИНЯЕВ,

С.И. РУПАСОВ, Е.А. БАШКИРОВ, Е.А. ЛЕВАШОВ

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ СО СТРУКТУРОЙ МАХ- И МАВ-ФАЗ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВС-ПОРОШКОВ

Покрытия на основе фаз Ti_2AlC , Cr_2AlC и $MoAlB$ на подложках из жаропрочных сплавов были получены методом искрового плазменного спекания. Покрытия толщиной 1.5-2 мм обладают плотной структурой и имеют твердость в диапазоне 12-20 ГПа. Нанесение покрытий позволяет существенно улучшить механические и трибологические свойства, а также стойкость к окислению жаропрочных сплавов. Повышение жаростойкости связано с образованием на поверхности покрытий при нагреве на воздухе плотных слоёв на основе оксидов алюминия и хрома.

PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV, A.D. CHERTOVA, A. ZACHINYAEV,

S.I. RUPASOV, E.A. BASHKIROV, E.A. LEVASHOV

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

INVESTIGATION OF COATINGS WITH STRUCTURE OF MAX- AND MAB-PHASES PRODUCED BY SPARK PLASMA SINTERING USING SHS POWDERS

Coatings based on Ti_2AlC , Cr_2AlC , and $MoAlB$ phases on substrates of heat-resistant alloys were obtained by spark plasma sintering. Coatings with a thickness of 1.5-2 mm have a dense structure and hardness in the range of 12-20 GPa. Coating can significantly improve the mechanical and tribological properties, as well as the oxidation resistance of heat-resistant alloys. The increase in oxidation resistance is associated with the formation of dense layers based on aluminum and chromium oxides on the surface of coatings when heated in air.

В современных условиях, когда потенциал консолидированных материалов исчерпан, важное значение приобретает создание новых функциональных покрытий. Для защиты ответственных изделий, подверженных различным видам износа, а также воздействию высоких температур и агрессивных газовых сред, перспективным является применение покрытий со структурой MAX- и MAB-фаз.

Целью данной работы являлось изготовление методом искрового плазменного спекания (ИПС) покрытий на основе фаз Ti_2AlC , Cr_2AlC и $MoAlB$, комплексное исследование структуры и свойств полученных покрытий.

В качестве прекурсоров для ИПС применялись порошки с высокой объёмной долей фаз Cr_2AlC , Ti_2AlC и $MoAlB$, полученные с использованием метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Продукты СВС в виде пористых спёков измельчали в щековой дробилке и размалывали в шаровой вращающейся мельнице. В качестве подложек использовались диски из титанового (ВТ-14), хромового (ВХ1-17А) и молибденового (МЧ-1) сплавов. Шихта размещалась таким образом, чтобы закрыть поверхность подложки со всех сторон. Процесс ИПС проводился на установке Labox 650, Sinter Land при температуре $T=1300^{\circ}\text{C}$ в течение 10 мин при давлении 40 МПа. После ИПС образцы подвергались шлифовке, полировке и резке. Структуру и состав покрытий исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и рентгенофазового анализа (РФА). Механические и трибологические свойства покрытий определялись при микро- и наноиндентировании, трибоиспытаниях «стержень-диск». Жаростойкость покрытий оценивалась при $T=700-1200^{\circ}\text{C}$. После отжигов покрытия были исследованы методами СЭМ, ЭДС и РФА.

Результаты РФА исследований показали, что основу покрытий составляют фазы Ti_2AlC , Cr_2AlC и $MoAlB$. Также обнаружены фазы Ti_3AlC_2 , Ti_2C , C , Cr_7C_3 , MoB , $MoAl_x$. По данным СЭМ все покрытия обладали равномерной структурой с толщиной слоёв 1.5-2.0 мм. На границах раздела «ИПС-покрытие/подложка» формируются переходные слои с повышенным содержанием основного элемента подложки. Покрытия характеризовались твёрдостью от 12 до 20 ГПа, модулем упругости в диапазоне 200-300 ГПа, упругим восстановлением 30-45%. Покрытие Ti_2AlC обладало коэффициентом трения $f = 0,34$, что в ~2 раза ниже данных для подложки из Ti. Приведённый износ (V_w) подложки снижался в 3,5 раза при осаждении покрытия Ti_2AlC . Покрытие Cr_2AlC обладало минимальным $f = 0,26$. За счёт нанесения Cr_2AlC значения V_w подложки Cr уменьшались на 2 порядка, f в 2 раза. Установлено, что покрытие Ti_2AlC окисляется по параболическому закону со скоростью в 11 раз меньшей скорости окисления Ti-сплава. Согласно данным РФА и РЭМ-ЭДС на поверхности образуется при нагреве защитный слой на основе Al_2O_3 толщиной ~6 мкм. Процесс окисления Cr_2AlC описывается логарифмическим законом, при этом нанесение Cr_2AlC снижает скорость окисления Cr-сплава на 20%, что обусловлено формированием защитного поверхностного слоя $Cr_2O_3/CrO_3+Al_2O_3$ толщиной ~2 мкм. Покрытия $MoAlB$ успешно сопротивлялись окислению на воздухе при температуре 1200°C за счёт образования поверхностной пленки Al_2O_3 , препятствующей диффузии кислорода вглубь материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-49-00141).

А.В. КЛАУЗ, С.В. РОГОЖКИН, А.А. ХАЛЯВИНА, А.А. БОГАЧЕВ, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

КОМПЛЕМЕНТАРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ

Дисперсно-упрочнённые стали 10Cr ODS, KP-3 ODS, Eurofer ODS и 13.5Cr-Fe₃Y ODS исследованы в исходном состоянии и после термического старения при 650°C до 500 ч и 1000 ч. Исследования проведены с использованием комплементарных методов просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), атомно-зондовой томографии (АЗТ) и малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР).

A.V. KLAUZ, S.V. ROGOZHIN, A.A. KHALYAVINA, A.ABOGACHEV, A.G. ZALUZHNYI
NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

RESEARCH OF THE EFFECT OF THERMAL AGING ON THE NANOSTRUCTURE OF OXIDE DESPERSION STRENGTHENED STEELS

Oxide dispersion-strengthened (ODS) steels 10Cr ODS, KP-3 ODS, Eurofer ODS, and 13.5Cr-Fe₃Y ODS were examined in their initial state and after thermal aging at 650 °C for 500 and 1000 hours. The analyses employed complementary methods, including transmission electron microscopy (TEM), atom probe tomography (APT) and small-angle X-ray scattering (SAXS).

В перспективных ядерных и термоядерных реакторах материалы активной зоны должны обладать высокой радиационной стойкостью и жаропрочностью при температурах до 650°C и дозах до 200 сна (смещений на атом). Перспективными материалами, способными удовлетворить эти требования, являются дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали, содержащие в своей матрице однородно распределенные термически стабильные наноразмерные оксиды [1,2].

Сравнение полученных данных после термического старения с данными для исходного состояния демонстрирует во всех сталях рост объёмной плотности кластеров (при сохранении или росте среднего размера) при старении в течение 500 ч, соответствующий стадии зарождения кластеров. В то время как после старения в течение 1000 ч обнаружено уменьшение объёмной плотности, что соответствует стадии созревания/коалесценции. Данные закономерности также подтверждаются анализом изменения концентрации химических элементов в матрице. Изменения объёмной плотности, средних размеров, химического состава кластеров, а также матрицы указывают на существенное взаимодействие кластеров и оксидов в исследуемых материалах в условиях термического старения при 650°C до 1000 ч.

После старения в течение 500 ч при 650°C обнаружено, что в 13.5Cr-Fe₃Y ODS оксидные частицы немного уменьшаются в размере до ~10 нм при сохранении объёмной плотности; поры немного уменьшаются в размере до ~3 нм и увеличивается их объёмная плотность до $42 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Исследование после старения в течение 1000 ч при 650°C обнаружило, что оксидные частицы сохраняют средний размер ~10 нм, а объёмная плотность увеличивается до $7 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

Исследование методом МУРР после термического старения показало незначительные увеличение (менее чем на 1 нм) средних размеров в исследованных сталях, а также уменьшение объёмной плотности (менее чем на $1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$) для 9Cr ODS и 10Cr ODS при термическом старении до 1000 ч. При этом в стали KP-3 ODS обнаружено небольшое увеличение объемной плотности включений (менее чем на $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$), предположительно обусловленное взаимодействием подсистем оксидов и кластеров. В целом, полученные результаты демонстрируют высокую термическую стабильность наноразмерных оксидных частиц в исследованных ДУО сталях. В тоже время следует отметить, что низкий контраст кластеров при малоугловом рентгеновском рассеянии не позволил их выявить и проанализировать их изменения при старении.

Комплекс исследований показал наличие характерных изменений в подсистеме кластеров при высокой стабильности подсистемы оксидных частиц, а также наличие их взаимодействия.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП КАМИКС (<http://kamiks.itep.ru>) НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. B. Mouawad, X. Boulnat, D. Fabrègue, M. Perez, Y. de Carlan // Journal of Nuclear Materials, 465 (2015) 54-62
2. Xu S., Zhou Z., Jia H., Yao Z. // Steel research int. 2018. V. 90. P. 1800594.

А.В. КОРОТКИХ, П.Ф. КАРЦЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАСЧЁТ МНОГОЧАСТИЧНОЙ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕЙ АБРИКОСОВА В ИНТЕРТИПНОМ СВЕРХПРОВОДНИКЕ В РАМКАХ ТЕОРИИ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ

Решается задача о расчёте энергии взаимодействия для системы вихрей Абрикосова с учётом многочастичных эффектов, которые существенны при высокой плотности вихрей и в т.н. интертипных материалах, у которых длина когерентности и глубина проникновения имеют сравнимые величины. Система уравнений Гинзбурга-Ландау решается численно при помощи метода установления. Этот подход позволяет уточнить модель взаимодействия, используемый при моделировании поведения вихревой системы методами Монте-Карло и молекулярной динамики.

A.V. KOROTKIKH, P.F. KARTSEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CALCULATION OF MANY-PARTICLE INTERACTION ENERGY OF ABRIKOSOV VORTICES IN INTERTYPE SUPERCONDUCTOR WITHIN THE FRAMEWORK OF THE GINZBURG-LANDAU THEORY

We calculate the interaction energy for Abrikosov vortex system, taking into account many-particle effects important in the case of high vortex density and so-called intertype superconductors for which the values of coherence length and penetration depth are comparable. The equations of Ginzburg-Landau theory are solved numerically using pseudoviscosity method. This approach allows to improve the interaction model used in the Monte Carlo and molecular dynamics simulations of vortex system behavior.

Разработка современных сверхпроводящих устройств и повышение характеристик ВТСП материалов, работающих в условиях сильных магнитных полей или высокого транспортного тока, требует подбирать оптимальный вариант пиннинга для вихревой системы, который обеспечивает снижение потерь, улучшает стабильность и другие эксплуатационные характеристики. Часто для этого используется численное моделирование поведения вихревой системы с использованием методов Монте-Карло [1] и молекулярной динамики [2] на базе модели взаимодействия Лоренса-Дониака [3], которая хорошо применима для типичных ВТСП с параметром Гинзбурга-Ландау (ГЛ), значительно превышающим единицу. Однако в последние годы внимание исследователей начали привлекать так называемые интертипные сверхпроводники [4], у которых параметр ГЛ близок к единице. В таком случае вихрь нельзя считать бесконечно тонким и простая модель попарного взаимодействия по функции Макдональда K_0 требует уточнения. Подобное соображение также возникает для стандартных ВТСП материалов при высоком магнитном потоке и большой плотности вихрей Абрикосова.

В данной работе представлен расчёт многочастичной энергии взаимодействия вихрей Абрикосова в сверхпроводящей пленке в рамках теории Гинзбурга-Ландау [5,6,7]. Для решения системы уравнений ГЛ используется метод установления [8] и далее при помощи численного интегрирования рассчитывается энергия Гиббса системы вихрей в зависимости от их расположения. В качестве стартового решения используется комбинация рассчитанных заранее численных решений для одиночных вихрей, которые за счёт цилиндрической симметрии имеют более низкую размерность и могут быть надёжно получены с высокой точностью.

Эти результаты позволяют уточнить модель взаимодействия, используемую при моделировании поведения вихревой системы в ВТСП пленках при больших плотностях вихрей, а также расширить применимость методов Монте-Карло и молекулярной динамики на случай интертипного материала.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект государственного задания FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. A.N. Maksimova et al., Relaxation of the trapped magnetic flux in a mesoscopic HTS with artificial pinning in the form of submicron holes // Chinese Journal of Physics 88, 493 (2024).
2. X.B. Xu et al., Phase diagram of vortex matter of type-II superconductors // Phys. Rev. B 83, 014501 (2011).
3. W. Lawrence and S. Doniach, Theory of layer structure superconductors, in Proceedings of the 12th International Conference on Low Temperature Physics, Academic Press of Japan, Kyoto, 1971, pp. 361–362.
4. V.D. Neverov et al., Microscopic description of intermediate mixed state in superconductors between the first and second types // Phys. Rev. B 110, 054502 (2024).
5. Введение в физику сверхпроводников / Шмидт В.В. – М.: МЦНМО, 2000.
6. Теория сверхпроводимости / Шраффер Дж. – М.: Наука, 1970.
7. Введение в сверхпроводимость / Тинкхам М. – М.: Атомиздат, 1980.
8. P.F. Kartsev, Taking into account Abrikosov vortices in numerical solution of Ginzburg-Landau equations // J. Phys.: Conf. Ser. 1686, 012045 (2020).

А.Е. КРЮКОВА, П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СМЕСИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ

Проведен анализ устойчивости определения размерных распределений частиц по модельным данным интенсивности малоуглового рассеяния от смесей полидисперсных сферических и цилиндрических частиц. Показано, что при использовании параметрической модели распределения вероятность получения правильного решения методом нелинейных наименьших квадратов уменьшается при расширении диапазона стартовых значений параметров, а разброс решений, соответствующих побочным минимумам целевой функции возрастает.

A.E. KRYUKOVA, P.V. KONAREV, V.V. VOLKOV

National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

SOLUTION STABILITY FOR A MIXTURE OF POLYDISPERSE SPHERICAL AND CYLINDRICAL PARTICLES USING SMALL-ANGLE SCATTERING DATA

The stability of the determination of particle size distributions using model small-angle scattering intensity from mixtures of polydisperse spherical and cylindrical particles has been analyzed. It is shown that when using a parametric distribution model, the probability of obtaining the correct nonlinear least squares solution decreases when the range of starting parameter values is expanded, and the scatter of solutions corresponding to local minima of the target function increases.

Малоугловое рассеяние (МУР) является эффективным неразрушающим методом анализа распределений частиц в наноразмерном диапазоне (от 1 до 200 нм). В то же время обратная задача МУР из-за усреднения интенсивности по объему образца и ориентациям частиц плохо обусловлена, поэтому оценка устойчивости решений играет важную роль. Ранее нами рассматривалась возможность восстановления функции распределения частиц по размерам для данных МУР от полидисперсных сферических частиц [1], в данной работе изучалась устойчивость решений для смеси полидисперсных сферических и цилиндрических частиц с помощью программы POLYMIX [2], использующей алгоритм Левенберга-Марквардта [3] с простыми ограничениями на параметры.

Использовались модельные данные МУР от смеси сферических частиц (со средним радиусом 5.0 ± 0.5 нм) и цилиндрических частиц (со средним радиусом 4.0 ± 0.7 нм и длиной 50 нм) с объемными долями компонентов смеси 60% и 40%, соответственно. К теоретическим данным добавлялся шум с относительным уровнем 10%, отвечающий распределению Пуассона (рис. 1а). Для каждого из шести параметров (объемной доли, среднего радиуса и полидисперсности сфер и цилиндров) его стартовое значение случайным образом выбиралось внутри области с относительной отстройкой от точного значения в диапазоне от 5% до 100%. Для каждого уровня отстройки было проведено по 50 запусков программы поиска. Если найденные значения параметров оказывались в пределах 5% от точных значений, то найденное решение считалось успешным. Решения, выходящие за данные пределы, оказывались либо неоднозначными (при малой величине невязки по интенсивности), либо попадали в локальные минимумы целевой функции вдалеке от правильного решения (рис. 1б).

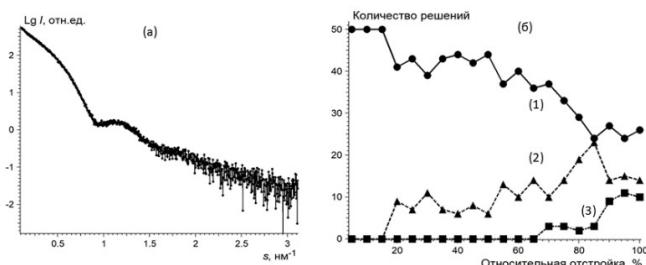


Рис. 1. (а) Кривая малоуглового рассеяния от смеси полидисперсных сферических и цилиндрических частиц.

(б) Зависимость решений от относительной отстройки стартовых значений параметров моделей:

кривая 1 – количество успешных восстановлений, кривая 2 – количество неоднозначных решений,
кривая 3 – число попаданий в локальные минимумы целевой функции.

Из рис. 1 видно, что при относительной отстройке стартовых значений параметров модели в пределах 50%, вероятность нахождения правильного решения составляет выше 80%, тогда как при более высокой степени отстройки вероятность неоднозначных решений и попаданий в локальные минимумы целевой функции резко возрастает.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Kryukova A.E., Konarev P.V., Volkov V.V. // Cryst. Reports. 2021, Vol. 66, № 5, P. 758-764.
2. Volkov V.V., Konarev P.V., Kryukova A.E. // JETP Letters. 2020. Vol. 112, № 9, P. 591-595.
3. Gill P.E., Murray W., Wright M.H., Practical Optimization, Academic Press, London, 1981.

Д.О. КУЗОВКОВ^{1,2,3}, П.А. СМИРНОВ^{1,2,3}, Я.С. ЛЕБЕДЕВА¹, К.Г. НИКИТИН¹, М.Е. ФЕДЯНИНА¹,
С.А. КОЗЮХИН⁴, И.А. БУДАГОВСКИЙ², М.П. СМАЕВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», Зеленоград, Москва, Россия

⁴Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ТЕЛЛУРИДНЫХ ПЛЕНОК ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Представлены результаты фемтосекундной модификации аморфных пленок халькогенидных соединений $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeTe и Sb_2Te_3 . В узком диапазоне плотностей энергий в пленках GeTe и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ были получены периодические поверхности структуры, образованные чередующимися линиями аморфной и кристаллической фаз, в то время как в Sb_2Te_3 двухфазные периодические структуры не формировались.

D.O. KUZOVKOV^{1,2,3}, P.A. SMIRNOV^{1,2,3}, Y.A.S. LEBEDEVA¹, K.G. NIKITIN¹, M.E. FEDYANINA¹, S.A. KOZYUKHIN⁴, I.A. BUDAGOVSKY², M.P. SMAEV^{1,2}

¹National Research University “Moscow Institute of Electronic Technology”, Zelenograd, Moscow, Russia

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

³LLC SPC "Lasers and Equipment TM ", Zelenograd, Moscow, Russia

⁴Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow, Russia

MODIFICATION OF THE SURFACE OF THIN TELLURIDE FILMS BY FEMTOSECOND LASER PULSES

The results of femtosecond modification of amorphous films of chalcogenide compounds $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeTe and Sb_2Te_3 are presented. In a narrow range of laser energy fluences, periodic surface structures in the form of alternating lines of amorphous and crystalline phases were obtained in GeTe and $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films, while in Sb_2Te_3 , two-phase periodic structures were not formed.

Тонкопленочные фазопеременные материалы привлекают фундаментальный и прикладной интерес вследствие возможности быстрых обратимых переключений между кристаллической и аморфной фазами. Наиболее изученным является тройное соединение системы $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, представляющее собой комбинацию бинарных соединений GeTe и Sb_2Te_3 , которые также являются фазопеременными материалами. При воздействии ультракоротких лазерных импульсов на поверхности $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ могут формироваться лазерно-индуцированные периодические структуры (ЛИППС). ЛИППС в $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ представляют собой чередующиеся линии аморфной и кристаллической фаз, ориентированные перпендикулярно поляризации светового поля и характеризующиеся периодом, соответствующим длине волны излучения. Возникновение ЛИППС может быть связано с интерференционным взаимодействием падающего излучения и вторичной поверхностной плазмон-поляритонной волны.

В данной работе проводились сравнительные исследования формирования ЛИППС ультракороткими импульсами на поверхности бинарных компонент системы $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, т.е. GeTe и Sb_2Te_3 . Тонкие пленки образовывались при помощи магнетронного распыления при постоянном токе в атмосфере аргона при давлении $5.7 \cdot 10^{-1}$ Па. Толщины тонких пленок составили около 120 нм. Поверхностная модификация халькогенидных пленок проводилась лазерным излучением с длинной волны 1030 нм при длительности импульса 250 фс (частота следования 100 кГц, энергия в импульсе 1 мДж). Сканирование поверхности пленки лазерным пучком производилось посредством гальванометрического сканатора.

В результате лазерного воздействия были получены ЛИППС на поверхностях пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и GeTe , в то время как на материале Sb_2Te_3 ЛИППС не было обнаружено. Пороговая плотность энергии формирования ЛИППС в $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ была равна $F_0 = 5.6$ мДж/см², а для GeTe $F_0 = 8.9$ мДж/см². Исследования морфологии пленок посредством атомно-силовой микроскопии показали, что период сформировавшихся ЛИППС составлял около 1 мкм. Разница по высоте между аморфными гребнями и кристаллическими впадинами для GeTe составляет $H_1 = 4 \div 5$ нм, что несколько выше значения $H_1 = 2 \div 3$ нм для аналогичной величины в случае $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Результаты анализа ЛИППС посредством оптической и атомной-силовой микроскопии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния указывают на сходство механизмов формирования периодических структур в GeTe и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Отсутствие периодических структур в случае Sb_2Te_3 может быть обусловлено меньшей проводимостью данной системы и различиями в механизмах кристаллизации.

В.П. ЛЕНКОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОТОКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИХРЕЙ ПО СКОРОСТЯМ В ВТСП ПРИ ПРОТЕКАНИИ ТРАНСПОРТНОГО ТОКА

Методом Монте-Карло в рамках двумерной модели слоистого высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) с центрами пиннинга при протекании транспортного тока рассчитано распределение магнитного поля вдоль пластины и поле средних скоростей вихрей. Получено распределение сверхпроводящего тока вдоль пластины. Результаты работы будут использованы в дальнейших расчетах отклика сверхпроводника на импульсные токовые воздействия.

V.P. LENKOV, A.N. MAKSIMOVA, A.N. MOROZ, V.A. KASHURNIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MAGNETIC FLUX CONFIGURATIONS AND VORTEX VELOCITY DISTRIBUTION IN HTS UNDER TRANSPORT CURRENT FLOW

The distribution of the magnetic field along the plate and the field of mean vortex velocities have been calculated by the Monte Carlo method in the framework of a two-dimensional model of a layered high-temperature superconductor (HTS) with pinning centres when the transport current flows. The distribution of superconducting current along the plate is obtained. The results of the work will be used in further calculations of the superconductor response to impulse current effects.

Одной из важнейших характеристик сверхпроводника является плотность критического тока, в сверхпроводниках второго рода определяемая структурой и конфигурацией центров пиннинга в образце. От данной величины зависит, в частности форма отклика образца на импульсное воздействие магнитным полем и транспортным током [1]. Исследование импульсного воздействия надкритических токов актуально, в частности, при создании токоограничителей [2]. Для надежного предсказания транспортных характеристик сверхпроводника необходимо исследовать взаимодействие отдельных вихрей с дефектами и их движение под действием транспортного тока; данная задача эффективно решается с помощью численного моделирования. Одним из таких методов является Монте-Карло. В нашей работе в рамках двумерной модели слоистого ВТСП [3] рассчитаны профили магнитного поля в сверхпроводнике с центрами пиннинга, на основе вихревой конфигурации рассчитано распределение сверхпроводящих токов в образце, выявлены области, где величина тока приближается к критической. Получена двумерная карта распределения скоростей вихрей в случае, когда величина тока превышает критическую. Данные результаты допускают прямое сопоставление с экспериментом. Результаты расчетов будут использованы в дальнейшем для исследования отклика сверхпроводника на импульсное воздействие надкритического тока.

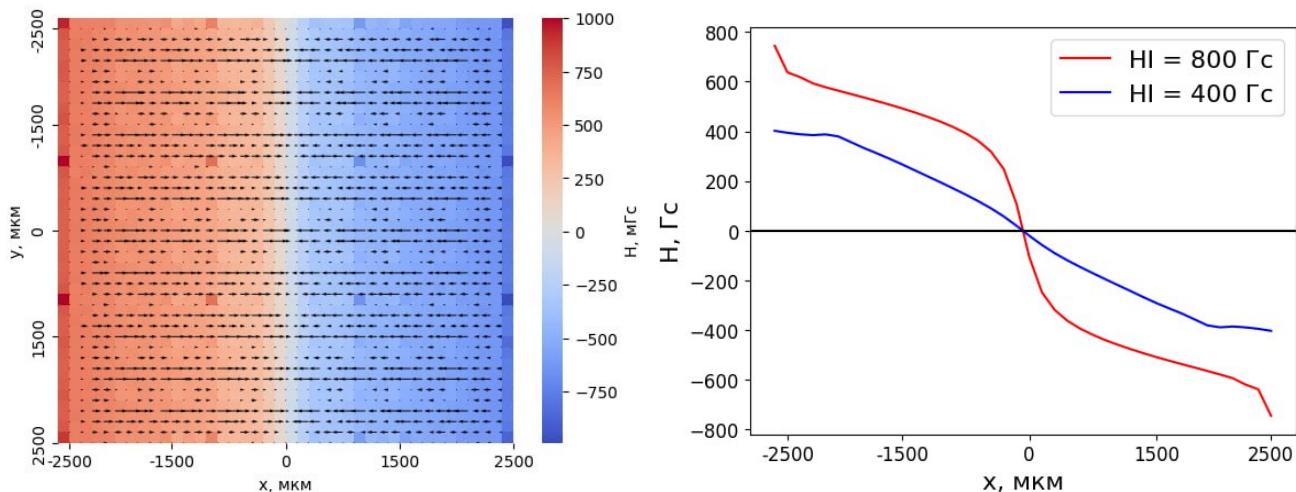


Рис. 1. Распределение локального магнитного поля в образце с квадратной решеткой центров пиннинга и поле скоростей вихрей (черные стрелки). Справа: профиль магнитного поля при двух значениях I_t – собственного поля транспортного тока.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2025-0008) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Tsuchiya Y. et al. //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2023. V. 33. №. 5. P. 1-5.
2. Sotelo G. G. et al. //Superconductivity. 2022. V. 3. P. 100018.
3. Maksimova A. N. // PhysicaScripta. 2024. Vol. 99. №. 10. P. 105938.

Д.Э. ЛЕСНЫХ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГЕТЕРО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ WSe₂ В ЖИДКОСТИ

Исследованы характеристики формирования наночастиц в процессе импульсной лазерной абляции мишени WSe₂ в жидкостях средах, таких как изопропиловый спирт и дистиллированная вода. Проведён анализ морфологии, а также структурного и химического состояния получаемых наночастиц. Определены условия синтеза наночастиц с гетеропереходом WSe₂/WO₃, способствующим активации процессов выделения водорода из кислотного раствора под воздействием видимого света.

D.E. LESNYKH, D.V. FOMINSKI, R.I. ROMANOV, V.YU. FOMINSKI
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

FORMATION OF HETERO-STRUCTURED NANOPARTICLES BY PULSED LASER ABLATION OF WSe₂ IN LIQUID FOR HYDROGEN PHOTOCATALYSIS

The features of nanoparticle formation through pulsed laser ablation of a WSe₂ target in liquid media (isopropyl alcohol and distilled water) have been investigated. The morphology, structural, and chemical states of the formed nanoparticles were analyzed. Conditions for obtaining nanoparticles with a heterojunction of WSe₂/WO₃, which facilitates the activation of hydrogen evolution processes from an acidic solution under visible light irradiation, were determined.

Разработка водородной энергии в значительной степени зависит от решения проблемы создания эффективных катализаторов для водорода. Необходимы недорогие катализаторы, которые могли бы заменить дорогостоящие катализаторы на основе металлов платиновой группы. Последние исследования показали, что наноструктурированные халькогениды переходных металлов (ХПМ) могут служить альтернативой таким катализаторам. Лазерные методы производства таких наночастиц отличаются технологической простотой, экологичностью и универсальностью. Тем не менее, успех этих методов во многом определяется пониманием механизмов формирования наночастиц с заданными свойствами. Целью данной работы стало сравнительное исследование морфологии, структурных и химических состояний, а также катализаторных свойств наночастиц, образованных в процессе импульсной лазерной абляции мишени WSe₂ в воде и изопропиловом спирте.

Импульсы лазера Solar LQ529 с наносекундной длительностью использовались для лазерной абляции мишени WSe₂. Пластиинки WSe₂ располагались на дне контейнера, который заполнялся жидкостью. Размер получаемых наночастиц изменялся в диапазоне от 5 до 200 нм. Несмотря на сходство в морфологии осажденных наночастиц, их фазовый и химический состав оказался различным (см. рис. 1 а и б). При лазерной абляции в воде химическое состояние наночастиц формировалось под воздействием взаимодействия эрозионного факела с кислородом, что проявлялось значительно слабее при работе с изопропиловым спиртом. В результате в воде активно образовывались наночастицы оксида вольфрама. В спирте же в условиях конкуренции процессов окисления, карбонизации и селенирования формировались гибридные наночастицы, содержащие нанофазы WSe₂, WO₃, W и W-Se-O. Селен мог выделяться в своем элементарном состоянии. Гибридные наночастицы, образованные в процессе абляции в спирте, демонстрировали достаточно высокие фотоэлектрокаталитические свойства в реакции выделения водорода в кислой среде. Уровень фототока (при нулевом потенциале) для каталитических пленок, полученных путем осаждения суспензии лазерно-аблированных наночастиц, превосходил фототок для гибридных нанокатализаторов, созданных ранее посредством последовательного осаждения фотоактивных WO₃ и каталитически активных MoS_x слоев из лазерной плазмы в условиях вакуума [1].

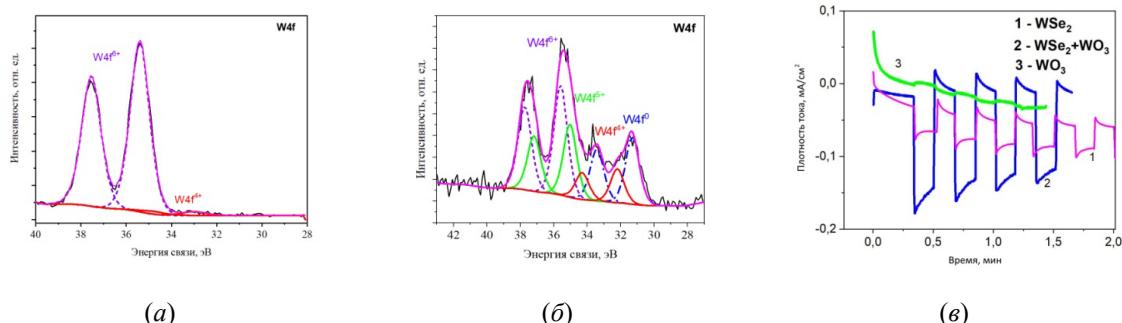


Рис. 1. Химическое состояние W в наночастицах, сформированных импульсной лазерной абляцией WSe₂ в (а) воде и (б) спирте. Временная развертка плотности тока при чипировании электрода светом (в).

Список литературы

1. Fominski V., Gnedovets F., Fominski D., Romanov R. et al. // Nanomaterials 2019. Vol. 9. Iss. 10. art. 1395.

А.В. ЛИТВИНОВ, М.О. ЭТРЕКОВА, Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, И.Д. ПЕВЦОВ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СОЧЕТАНИЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОГО И МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ГАЗА

Исследована чувствительность датчиков на основе МДП-структур Pt-PdO-SiO₂-Si-Pt к содержанию H₂, H₂S, NO₂ и NH₃ в воздухе в зависимости от режимов термической постобработки в среде чистого воздуха и в смеси с водородом.

A.V. LITVINOV, M.O. ETREKOVA, N.N. SAMOTAEV, K.YU. OBLOV, I.D. PEVTSOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

COMBINATION OF PULSED LASER AND MAGNETRON SPUTTERING METHODS FOR THE MANUFACTURE OF SOLID-STATE CAPACITIVE GAS SENSORS

The sensitivity of gas sensors based on the MIS structures Pt-PdO-SiO₂-Si-Pt to the content of H₂, H₂S, NO₂ and NH₃ in the air, depending on the modes of thermal post-treatment in the air environment and in the air mixture with hydrogen, has been studied.

Технологии лазерного и магнетронного распыления вещества – основательно апробированные и успешно применяемые методы получения тонких пленок, в т.ч. для изготовления твердотельных газовых датчиков, например, на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Ранее в [1] было показано, что метод напыления может служить инструментом регулирования свойств газовой чувствительности сенсоров, и сочетание разных методов также представляет научный интерес. Газовые датчики сегодня помогают эффективно решать вопросы промышленной и транспортной безопасности, медицинской диагностики, геологоразведки и многие др. Однако поиски решения главной проблемы (селективности) продолжают активно стимулировать исследования новых функциональных материалов и наносистем. Результаты подобных изысканий совместно с технологиями искусственного интеллекта в перспективе позволят с помощью газовых сенсоров достоверно детектировать присутствие и/или измерять концентрацию целевого вещества на фоне других сопутствующих компонентов газовой смеси.

Цель настоящей работы – изучение газочувствительных свойств емкостных МДП датчиков на основе структуры Pt_(ч)-PdO-SiO₂-Si-Pt_(К), схематически представленной на рис. 1(а), где даны следующие обозначения: 1) Pt_(ч) – пористый платиновый электрод, полученный методом магнетронного распыления в среде аргона с давлением 30 Па через маску с отверстиями \varnothing 2,5 мм; 2) PdO – каталитически активный слой, полученный методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО) палладия в вакууме через маску с отверстиями \varnothing 2 мм и последующей стабилизации и окисления на воздухе в муфельной печи; 3) SiO₂ – оксидная пленка толщиной \approx 100 нм, полученная в сухом кислороде при 1100 °C; 4) Si – пластина кремния КЭФ-32, ориентация (111), толщина 500±20 мкм; 5) Pt_(К) – сплошной платиновый омический контакт, полученный методом ИЛО и отожженный одновременно с Pd-пленкой; 6) K₁ и K₂ – электрические контакты МДП-конденсатора, приклеенные токопроводящим клеем.

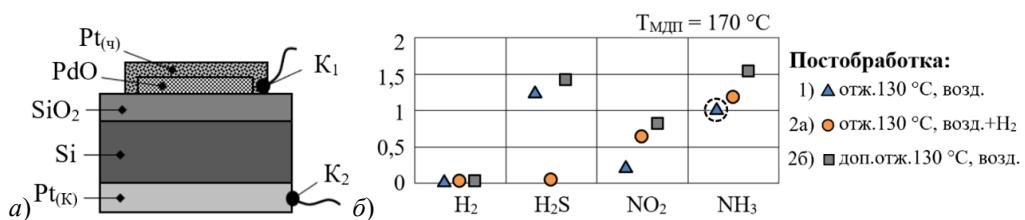


Рис. 1.(а) Схема экспериментальной МДП-структуры (обозначения см. в тексте выше). (б) Влияние постобработки на чувствительность к газам в воздухе при рабочей температуре датчиков 170 °C. По оси ординат – величина чувствительности, нормированная на значение чувствительности к NH₃ после начального отжига 130°C в воздухе (точка выделена пунктиром).

На основе полученных структур изготовлены газовые МДП датчики и исследованы их параметры чувствительности к различным газам в воздухе (H₂, H₂S, NO₂ и NH₃) с концентрацией не более 5 ppm для водорода и 0,2...0,5 ppm для остальных газов. Установлено влияние постобработки (отжига) в среде чистого воздуха и в смеси с H₂. В частности, показано (рис. 1, б), что отжиг в смеси воздух + H₂ значительно уменьшает чувствительность к H₂S, но не оказывает влияния (в пределах погрешности измерения) на чувствительность к NH₃. Чувствительность к NO₂, напротив, увеличивается с постобработкой, причем независимо от содержания H₂ в смеси воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, соглашение № 24-79-10278 от 31.07.2024 г.

Список литературы

1. Этрекова М.О., Литвинов А.В., Самотаев Н.Н. и др. // Мокеровские чтения. 13-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. М., 2022. С. 50-51.

А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

НАМАГНИЧЕННОСТЬ СЛОИСТОГО АНИЗОТРОПНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Методом Монте-Карло для вихревой системы в слоистом анизотропном ВТСП выполнен расчет кривых намагниченности образца с наклонными колончатыми центрами пиннинга. Получена убывающая зависимость ширины петли перемагничивания от наклона магнитного поля к оси анизотропии. Рассчитаны величины угла между направлениями вихрей и магнитного поля, показано их соответствие для основной кривой намагничивания результатам анизотропной теории Гинзбурга-Ландау.

A.N. MAKSIMOVA, A.N. MOROZ, V.A. KASHURNIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MAGNETIZATION OF LAYERED ANISOTROPIC SUPERCONDUCTOR IN TILTED MAGNETIC FIELD

The Monte Carlo method for a vortex system in layered anisotropic HTS was used to calculate the magnetization curves of a sample with tilted columnar pinning centres. A decreasing dependence of the width of the remagnetization loop on the angle between the magnetic field and the anisotropy axis has been obtained. The values of the angle between the directions of vortices and the magnetic field are calculated, and their correspondence to the results of the anisotropic Ginzburg-Landau theory for the main magnetization curve is shown.

Современные наиболее перспективные ВТСП являются анизотропными веществами, в которых эффективная масса электрона различна в плоскости сверхпроводящих слоев и в направлении оси анизотропии. На практике сверхпроводник в ряде случаев находится в магнитном поле, поэтому магнитные и транспортные свойства образца зависят не только от величины поля, но и от его ориентации. Для предсказания характеристик сверхпроводника в заданных условиях широко используются численные методы, например, Монте-Карло и молекулярная динамика [1,2]. В работе [2] развита модель, включающая в численный расчет анизотропию сверхпроводника и зависимость энергии вихря от направления его магнитного потока. Получены различные вихревые конфигурации, возникающие в присутствии наклонных колончатых центров пиннинга. В нашей работе выполнены расчеты кривых намагниченности слоистого анизотропного сверхпроводника в наклонном магнитном поле в присутствии колончатых дефектов, наклонных к оси анизотропии. Получены убывающие зависимости ширины петли (пропорциональной критическому току) от наклона магнитного поля. Расчеты выполнены методом Монте-Карло для вихревой системы [3], при этом модель была расширена на случай наклонного внешнего магнитного поля.

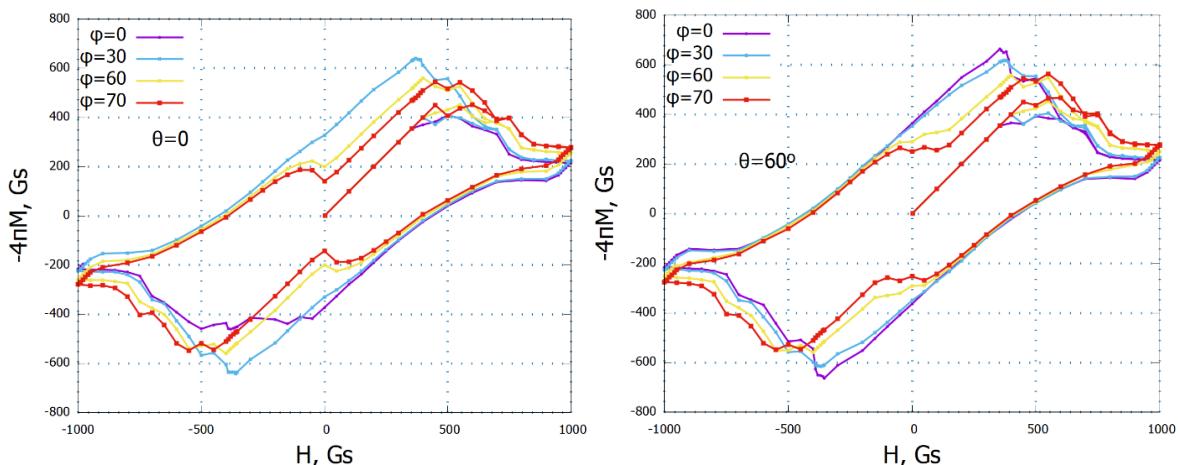


Рис. 1. Кривые намагниченности слоистого анизотропного сверхпроводника с колончатыми дефектами, параллельными оси анизотропии и составляющими угол $\theta=60^\circ$ с осью анизотропии. Кривые рассчитаны при различных значениях ϕ – угла между магнитным полем и осью анизотропии.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. Paturi P. //Journal of Physics: Condensed Matter.2018. Vol. 30. №. 31. P. 315902.
2. Kato M. //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2022. Vol. 2323. №. 1. P. 012014.
3. Maksimova A.N. // PhysicaScripta. 2024. Vol. 99. №. 10. P. 105938.

И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, Д.А. АБИН, К.А. БОРОДАКО
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ В НЕИЗОЛИРОВАННЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОБМОТКАХ

В работе рассматриваются актуальные вопросы исследования процессов распространения нормальной зоны (РНЗ) и токовой стабилизации высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с использованием неизолированных сверхпроводящих обмоток (НИСО). Основное внимание уделено влиянию различных режимов охлаждения на динамику и скорость РНЗ в НИСО при стационарных и импульсных токовых возбуждениях. Получены зависимости отклика напряжения от импульса тока, распределения нагрева по слоям НИСО во времени и динамики фронта РНЗ в продольном и радиальном направлениях.

I.V. MARTIROSIAN, D.A. ALEKSANDROV, D.A. ABIN, K.A. BORODAKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

NUMERICAL MODELING OF NORMAL ZONE PROPAGATION PROCESSES IN NON-INSULATED SUPERCONDUCTING WINDINGS

The study is dedicated to the topic of normal zone propagation (NZP) processes and current stabilization of high-temperature superconductors (HTS) using non-insulated superconducting windings (NISO). The main attention is paid to the influence of different cooling modes on the dynamics and rate of NZP in NISO under stationary and pulsed current excitations. The dependences of the voltage response on the current pulse, the heating distribution over the NISO layers in time, and the dynamics of the NZP front in the longitudinal and radial directions are presented.

В связи растущими перспективами применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) при разработке высокоточных электромагнитов для генерации сверхсильных магнитных полей, в настоящее время особое внимание уделяется исследованиям процессов распространения нормальной зоны (РНЗ) [1], а также методам дополнительной электрической стабилизации ВТСП обмоток. Одним из методов токовой стабилизации ВТСП катушек является использование неизолированных сверхпроводящих обмоток (НИСО), что, по сути, обеспечивает шунтирование ВТСП обмотки соседними проводящими слоями [2]. При этом необходимо исследовать влияние различных режимов охлаждения на РНЗ в НИСО.

В настоящей работе представлены результаты, описывающие динамику и скорости распространения нормальной зоны в НИСО при стационарных и импульсных токовых возбуждениях, выявлено влияние дефектов и неоднородностей критического тока ВТСП на процессы развития РНЗ в НИСО при следующих условиях охлаждения. Во-первых, при охлаждении неизолированных сверхпроводящих обмоток жидким азотом с учетом гистерезисного характера кривой кипения этого хладагента. Во-вторых, при охлаждении НИСО путем прокачки холодного газа. В-третьих, при охлаждении обмоток твердым азотом в широком интервале температур с учетом процессов плавления и испарения азота. Результаты включают в себя зависимости отклика напряжения от импульса тока, распределения локального и интегрального нагрева отдельных слоев НИСО в зависимости от времени, а также динамика фронта распространения нормальной зоны в продольном и радиальном направлениях неизолированной сверхпроводящей обмотки при стационарных и импульсных токовых возбуждениях для различных условий охлаждения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00278, <https://rsrf.ru/project/24-79-00278/>.

Список литературы

1. Janitschke M. et al. A simplified approach to simulate quench development in a superconducting magnet //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Т. 31. – №. 5. – С. 1-5.
2. Park D. et al. Design overview of the MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR magnet with a new REBCO insert //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Т. 31. – №. 5. – С. 1-6.

П.И. НИКОЛЕНКО, И.В. ЩЕТИНИН

Научно-исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Россия

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СА-ЛЕГИРОВАННОГО ГЕКСАФЕРРИТА СТРОНЦИЯ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Механохимическим методом получены образцы Са-легированного гексаферрита стронция. Проведён рентгенофазовый анализ, определена зависимость параметров элементарной ячейки гексаферрита от степени легирования, исследованы гистерезисные магнитные свойства. Определена граница растворимости Са в гексаферрите стронция при температуре 1200°C.

P.I. NIKOLENKO, I.V. SHCHETININ

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF CA-DOPED STRONTIUM HEXAFERRITE FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

Samples of Ca-doped strontium hexaferrite were obtained by a mechanochemical method. X-ray phase analysis was performed, the dependence of the hexaferrite unit cell parameters on the alloying degree was determined, and hysteresis magnetic properties were investigated. The solubility limit of Ca in strontium hexaferrite at a temperature of 1200 °C was determined.

В настоящее время внимание исследователей всё чаще привлекают исследования сложных магнитных оксидов для биомедицинских применений. Одним из перспективных материалов в этой области является гексаферрит стронция. Согласно ряду исследований [1,2], гексаферрит является нетоксичным материалом. Однако при разложении такого материала в организме часть содержащегося в нём стронция может замещать кальций в костной ткани. Этот потенциально негативный эффект можно минимизировать, если заместить часть стронция в материале на кальций.

В настоящей работе было проведено исследование структуры и магнитных свойств образцов Са-легированного гексаферрита стронция $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ($x=0\dots1$). Образцы были получены механохимическим методом с последующим высокотемпературным отжигом в воздушной атмосфере при 1200°C. Были проведены фазовый анализ и съёмка петель магнитного гистерезиса в полях до 1600 кА/м, по изменению объёма элементарной ячейки гексаферрита определена граница растворимости Са в гексаферрите стронция при температуре 1200°C.

По результатам фазового анализа образцы $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ с $x=0; 0,1; 0,2; 0,3$ и $0,5$ содержали 100% фазы гексаферрита стронция. Образец $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ с $x=0,75$ содержал 60% фазы гексаферрита стронция, а образец с $x=1$ не содержал фазу гексаферрита. На рисунке 1 приведено изменение объёма элементарной ячейки гексаферрита стронция от степени легирования образца x . Исходя из данных, приведённых на рисунке, граница растворимости Са в гексаферрите стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ составила $x=0,56\pm0,05$ атома кальция на формульную единицу гексаферрита.

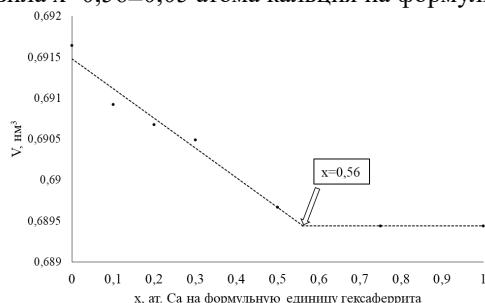


Рис. 1. Изменение объёма элементарной ячейки гексаферрита (V) от степени легирования образца Са (x)

Также было проведено исследование гистерезисных магнитных свойств образцов Са-легированного гексаферрита стронция. Для нелегированного образца $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ($x=0$) коэрцитивная сила H_c составила 140 кА/м, удельная намагниченность насыщения σ_s – 68,3 Ам²/кг, остаточная намагниченность σ_r – 29,4 Ам²/кг. Влияние кальция на удельную намагниченность насыщения несущественно в пределах области растворимости, значения коэрцитивной силы имеют тенденцию к небольшому снижению. Изменение магнитных свойств за пределами области растворимости определяется фазовым составом, и в соответствующих образцах наблюдается резкое падение намагниченности.

Таким образом, можно сделать вывод, что легирование гексаферрита стронция Са в пределах растворимости ($x=0,56$ при 1200°C) не снижает удельной намагниченности материала, что является значимым преимуществом для таких биомедицинских применений материала как, например, магнитная гипертермия и адресная доставка лекарств.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 23-73-00114.

Список литературы

1. Вершинина С.Ф., Евтушенко В.И. // Медицинский академический журнал. 2020. Том 20. №1. С. 75-82.
2. Nikolenko P.I., Nizamov T.R. and others // Materials. 2023. V.16(1): 347.

С.А. НУРЕТДИНОВ, В.В. ТАРКОВСКИЙ
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

РАЗМЕРНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ NiCr И Cu-Ag СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО РАЗРЯДА

Методами атомно-силовой микроскопии исследованы размерные характеристики наночастиц NiCr сплава и биметалла Cu-Ag и их конгломератов, синтезированных в плазме электровзрывного разряда в дистиллированной воде. Установлены зависимости размерных распределений синтезированных наночастиц от вложенной в электровзрывной разряд энергии.

S.A. NURETDINOV, V.V. TARKOVSKY
Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

SIZE DISTRIBUTIONS OF NiCr AND Cu-Ag NANOPARTICLES SYNTHESIZED IN ELECTRIC EXPLOSIVE DISCHARGE PLASMA

The dimensional characteristics of NiCr alloy and Cu-Ag bimetal nanoparticles and their conglomerates synthesized in the plasma of an electric explosive discharge in distilled water were studied using atomic force microscopy methods. The dependences of the dimensional distributions of the synthesized nanoparticles on the energy deposited in the electric explosive discharge were established.

Одним из перспективных методов получения наночастиц является их синтез в плазме электровзрывного разряда [1,2]. Тонкий проводник, находящийся в жидкости, нагружается электрическим импульсом большой силы тока. Проводник за микросекундные времена испаряется – происходит его электрический взрыв. На месте проводника в жидкости образуется плазменный канал. Синтез наночастиц происходит в плазме на стадии ее рекомбинации.

Установка для формирования сильноточных импульсов создана по аналогии с системами возбуждения электроразрядных лазеров и ламп [3,4]. Для расчета ее параметров использовались подходы, описанные в [5] с учетом данных [6]. Диспергированию подвергались проводники из NiCr сплава и биметалла медь-серебро Cu-Ag в 500 см³ дистиллированной воды. Размерные распределения наночастиц исследовались на атомно-силовом микроскопе NT-206. Размерные распределения наночастиц в зависимости от вложенной в разряд энергии приведены на рис.1-2.

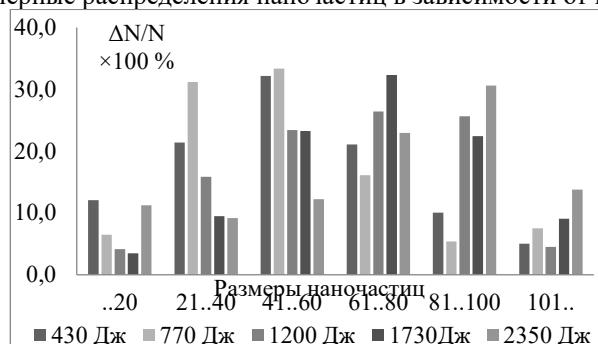


Рис. 1. Размерные распределения наночастиц NiCr сплава

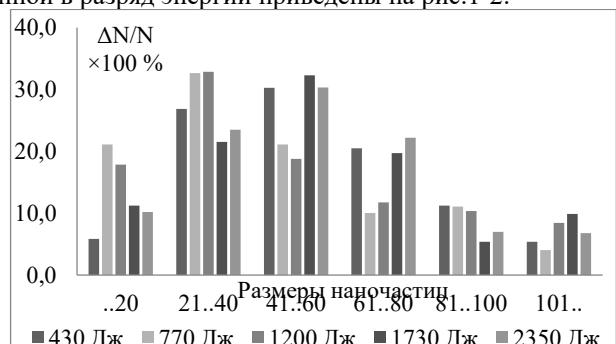


Рис. 2. Размерные распределения наночастиц биметалла Cu-Ag

Диспергирование проводников происходит в результате двух процессов. Первым является разлет микрокапель и испарения металла за счет термического нагрева. Вторым – электрический пробой паро-капельной смеси с формированием разрядной плазмы. Доминирование процесса определяется соотношением введенной в проводник энергии и энергии сублимации материала проводника. При малых значениях этого соотношения доминирует термическое диспергирование, а при больших – электроразрядное. Энергия сублимации для Ni и Cu (основных компонент) составляет 420 кДж/моль и 340 кДж/моль [7]. Массы проводников составляли 0,2 и 0,15 грамм для NiCr и Cu-Ag, или 0,0034 и 0,0023 моль соответственно, а энергии их сублимации ~1400 и ~750 Дж. При энергиях в 430 и 770 Дж доминирует первый процесс и по этой причине синтезированные наночастицы имеют большие размеры. При энергиях больших 770 Дж значительную роль играет второй процесс, и размеры наночастиц уменьшаются.

Список литературы

1. Ильин А.П., Назаренко О. Б., Тихонов Д. В. и др. // Перспективные материалы. 2010. № 2. С. 11–18.
2. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Лещик С.Д. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.6, Тэхніка. 2017. Т. 7, № 2. С. 47–57.
3. Anufriik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. // *Journal of Optical Technology*. 2000. V. 67, № 11. P. 961-967.
4. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. 2019. Т.9, № 2. С. 81–91.
5. Anufriik S.S., Volodenkov A.P., [Losev V.F.](#), Znosko K.F. // *Russian Physics Journal*. 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.
6. Белаш В.Ч., Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат., фіз., інфарм., выліч. тэхн. ікір.. 2018. Т. 8, № 3. С. 83–92.
7. Чичерская А.Л., Пупышев А.А. // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19, № 3. С. 230-241.

В.В. ПОПОВ¹, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ¹, Б.Р. ГАЙНАНОВ¹, А.А. ИВАНОВ¹,
С.Г. РУДАКОВ¹, А.А. ПИСАРЕВ¹, М.М. БЕРДНИКОВА¹, Е.С. КУЛИКОВА², Н.А. КОЛЫШКИН²,
Е.В. ХРАМОВ², Р.Д. СВЕТОГОРОВ², И.В. ЩЕТИНИН³, С.М. НОВИКОВ⁴, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ⁴,
Н.В. ОГНЕВСКАЯ⁵, Н.А. ЦАРЕНКО⁵, И.Г. РАЧЕНОК⁵, О.Н. СЕРЕГИНА⁵, О.Д. ХОРОЗОВА⁶,
И.М. МЕЛЬНИКОВА⁶

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

⁵АО ВНИПИПромтехнологии, Москва, Россия

⁶Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ, ЛОКАЛЬНУЮ И ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ГАФНАТОВ РЗЭ $Ln_2\text{Hf}_2\text{O}_7$

Исследованы структурные свойства высоконентропийных гафнатах РЗЭ $Ln_2\text{Hf}_2\text{O}_7$. Показано, что фазовый состав, параметры кристаллической и локальной структуры синтезированных образцов во многом определяются видом РЗЭ и температурой отжига.

V.V. POPOV¹, A.P. MENUSENKOVA¹, A.A. YASTREBTSEV¹, B.R. GAYNANOV¹, A.A. IVANOV¹,
S.G. RUDAKOV¹, A.A. PISAREV¹, M.M. BERDNIKOVA¹, E.S. KULIKOVA², N.A. KOLYSHKIN²,
E.V. KHRAMOV², R.D. SVETOGOROV², I.V. SHCHETININ³, S.M. NOVIKOV⁴,
M.K. TATMYSHEVSKIY⁴, N.V. OGNEVSKAYA⁵, N.A. TSARENKO⁵, I.G. RACHENOK⁵,
O.N. SEREGINA⁵, O.D. KHOROZOVA⁶, I.M. MELNIKOVA⁶

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

⁵JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

⁶State Research and Design Institute of Rare Metal Industry, Moscow, Russia

INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE CRYSTAL, LOCAL AND ELECTRONIC STRUCTURES OF HIGH-ENTROPY RARE EARTH HAFNATES $Ln_2\text{Hf}_2\text{O}_7$

The structural properties of high-entropy rare earth (RE) hafnates have been studied. It has been shown that phase composition, the parameters of the crystalline and local structure of $Ln_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ samples are largely determined by the type of RE and temperature.

В последние несколько лет высоконентропийные (ВЭ) сложные оксиды с общей формулой $A_2B_2O_7$ (где A = Ln – катионы РЗЭ, B – катионы металлов подгруппы IVB), имеющие структуру флюорита и/или пирохлора, привлекают всё большее внимание исследователей не только с научной, но и с практической точки зрения, поскольку эти соединения являются инновационными материалами для создания новых нейтронопоглощающих элементов водо-водяных энергетических реакторов на тепловых нейтронах, инертных матриц для хранения ядерных отходов, теплозащитных покрытий, катализаторов, прозрачной керамики и т. д.

Цель данной работы – изучение влияния вида РЗЭ и температуры синтеза на параметры кристаллической, локальной и электронной структуры ВЭ гафнатах РЗЭ $Ln_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ с использованием уникальной комбинации локально-чувствительных методов рентгеновской дифракции (s-XRD) и рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES и EXAFS); колебательной спектроскопии (ИК- и КР-спектроскопии), сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ-ЭДС), синхронного термического анализа (ДСК + ТГ).

Обнаружено, что все синтезированные прекурсоры были рентгеноаморфными смешанными гидратированными гидроксокарбонатами с общей формулой $Ln\text{Hf}(\text{OH})_{7-2y}(\text{CO}_3)_y \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Прокаливание прекурсоров приводило к их дегидратации, декарбонизации и кристаллизации с образованием ВЭ гафнатах РЗЭ $Ln_2\text{Hf}_2\text{O}_7$. Тип образующейся кристаллической структуры определялся как набором РЗЭ (и связанным с ним соотношением радиуса катионов $r_{Ln^{3+}}/r_{\text{Hf}^{4+}}$, а также параметром размерного беспорядка δ), так и температурой отжига. Использование колебательной спектроскопии позволило зафиксировать возможное образование нанодоменов с локальной структурой анионной подрешетки пирохлорного типа в матрице хорошо закристаллизованного флюорита, несмотря на её отсутствие, согласно результатам дифракции. Анализ XANES спектров L_3 -края Ln в ВЭ $(\text{La}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Er}_{0.2}\text{Y}_{0.2})_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ показал, что положение и форма «белых линий» типичны для катионов Ln^{3+} . При этом длины связей Ln - O не коррелируются с радиусами катионов Ln^{3+} , что может быть обусловлено сильным искажением локальной структуры исследованных образцов. В тоже время длина связи Hf-O практически не зависит от температуры отжига.

Работа была частично поддержана Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственный контракт FSWU-2023-0070).

В.В. ПОПОВ¹, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ¹, А.А. ИВАНОВ¹, С.Г. РУДАКОВ¹,
А.А. ПИСАРЕВ¹, М.М. БЕРДНИКОВА¹, Е.С. КУЛИКОВА², И.В. ЩЕТИНИН³, С.М. НОВИКОВ⁴,
М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ⁴, Н.В. ОГНЕВСКАЯ⁵, Н.А. ЦАРЕНКО⁵, И.Г. РАЧЕНОК⁵,
О.Н. СЕРЕГИНА⁵,

О.Д. ХОРОЗОВА⁶, И.М. МЕЛЬНИКОВА⁶

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

⁵АО ВНИПИПромтехнологии, Москва, Россия

⁶Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И ЛОКАЛЬНУЮ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ МОЛИБДАТОВ И ВОЛЬФРАМАТОВ РЗЭ $Ln_2(BO_4)_3$ (B = Mo, W)

Исследованы структурные свойства высокотемпературных молибдатов и вольфраматов РЗЭ $Ln_2(BO_4)_3$ (B = Mo, W). Показано, что фазовый состав и параметры кристаллической структуры синтезированных образцов во многом определяются видом d-элемента (Mo или W) и температурой отжига.

V.V. POPOV¹, A.P. MENUSHENKOV¹, A.A. YASTREBTSEV¹, A.A. IVANOV¹, R.G. RUDAKOV¹,
A.A. PISAREV¹, M.M. BERDNIKOVA¹, E.S. KULIKOVA², I.V. SHCHETININ³, S.M. NOVIKOV⁴,
M.K. TATMYSHEVSKIY⁴, N.V. OGNEVSKAYA⁵, N.A. TSARENKO⁵, I.G. RACHENOK⁵,
O.N. SEREGINA⁵, O.D. KHOROZOVA⁶, I.M. MELNIKOVA⁶

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

⁵JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

⁶State Research and Design Institute of Rare Metal Industry, Moscow, Russia

INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE CRYSTAL AND LOCAL STRUCTURES OF HIGH-ENTROPY RARE EARTH MOLYBDATES AND TUNGSTATES $Ln_2(BO_4)_3$ (B = Mo, W)

The structural properties of high-entropy rare earth molybdates and tungstates have been studied. It has been shown that phase composition and the parameters of the crystalline structure of the synthesized samples are largely determined by the type d-element (Mo or W) and calcination temperature.

Молибдаты и вольфраматы РЗЭ с общей формулой $Ln_2(BO_4)_3$ (где Ln – катионы РЗЭ, B - d-элемент Mo или W) характеризуются образованием большого числа возможных полиморфных форм, определяемых условиями синтеза (вид катионов, температура, давление и т.д.). Соединения данной группы являются перспективными материалами для использования в различных областях оптоэлектроники, таких как твердотельные лазеры, сцинтиляторы, рамановские преобразователи и т. д. Одним из наиболее многообещающих и быстрорастущих применений этих соединений является их потенциальное использование в области люминофоров. В последние несколько лет появились работы по синтезу и исследованию высокотемпературных (ВЭ) молибдатов и вольфраматов РЗЭ.

Цель данной работы – изучение влияния вида d-элемента (Mo, W) и температуры синтеза на параметры кристаллической структуры ВЭ молибдатов и вольфраматов РЗЭ с помощью уникальной комбинации рентгеновской дифракции с использованием синхротронного излучения (s-XRD); колебательной спектроскопии (ИК- и КР-спектроскопии), сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ-ЭДС), синхронного термического анализа (ДСК + ТГ).

Термообработка прекурсоров приводила к их дегидратации и кристаллизации, приводящей к образованию многофазных порошков. В случае ВЭ молибдатов при 500°C образец имел моноклинную структуру (пр. гр. I112/b(15)). Увеличение температуры отжига ≥ 600°C приводило к фазовому переходу с образованием модулированной моноклинной структуры (пр. гр. I112/b($\alpha\beta\theta$)00(15.1)), а также появлению дополнительных орторомбических фаз (пр. гр. Pba2(32) и Pnca(60)), доля которых увеличивалась с ростом температуры. В случае ВЭ вольфраматов имело место образование двух моноклинных фаз (пр. гр. P12₁/a1(14) и C12/c1(15)), доля которых слабо изменялась с ростом температуры. Следует отметить, что все наблюдаемые типы кристаллических структур были характерны для индивидуальных молибдатов и вольфраматов с данным видом катионов РЗЭ. Исследование локальной структуры синтезированных образцов показало наличие в них искаженных тетраэдров MoO_4 или WO_4 . Все синтезированные образцы молибдатов и вольфраматов РЗЭ были гигроскопичны. При этом вольфраматы были более гигроскопичны по сравнению с аналогичными молибдатами.

Работа была частично поддержана Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственный контракт № FSWU-2023-0070).

О.В. РУБИНКОВСКАЯ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

DFT-АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОФАЗ В КАТАЛИЗАТОРЕ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ MoS_x

Проведен анализ эффектов взаимодействия нанофаз в катализаторе водорода на основе MoS_x с различными гетеропереходами. Использован метод функционала плотности (DFT) для определения энергетических и катализитических характеристик поверхностей данных гетероструктур. Показано, что химическое состояние и взаимное расположение энергетических зон гетеропереходов MoS_x с различными фазами существенно влияют на эффективность разделения фотогенерированных носителей заряда. Исследования показали, что образование гетеропереходов между фазами MoS_x и другими материалами существенно влияет на электронные свойства катализатора, такие как уровень Ферми и плотность состояний.

O.V. RUBINKOVSKAYA, D.V. FOMINSKIY, R.I. ROMANOV, V.YU. FOMINSKIY

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DFT ANALYSIS OF NANOPHASE INTERACTIONS IN MoS_x-BASED HYDROGEN CATALYST

The effects of nanophasic interactions in the hydrogen catalyst based on MoS_x with various heterojunctions were analyzed. The density functional theory (DFT) method was used to determine the energetic and catalytic characteristics of the surfaces of these heterostructures. It was shown that the chemical state and relative alignment of the energy bands in MoS_x heterojunctions with different phases significantly influence the efficiency of separating photogenerated charge carriers. Studies revealed that the formation of heterojunctions between MoS_x phases and other materials significantly impacts the electronic properties of the catalyst, such as the Fermi level and density of states.

Развитие эффективных и доступных катализаторов для водородной энергетики является одной из важнейших задач современной науки. Среди множества материалов, применяемых для этого, сульфиды молибдена (MoS_x) занимают центральное место благодаря своей высокой катализитической активности, устойчивости и доступности. Однако эффективность таких катализаторов существенно зависит от взаимодействия нанофаз [1], образующихся в их составе, и от структуры гетеропереходов между ними. Гетеропереходы, образующиеся на интерфейсах MoS_x с металлическими фазами (Mo), пленками (WSe₂), оксидами молибдена (MoO_x) и дефектами (Mo-S-O), существенно влияют на катализитическую активность.

DFT-расчёты показывают, что на границе MoS_x/Mo возникает перенос заряда, приводящий к увеличению электронной плотности на активных центрах MoS_x. На интерфейсе MoS_x/WSe₂ образуется слабое ван-дер-ваальсовое взаимодействие, которое сохраняет структурную целостность MoS_x, но одновременно позволяет эффективный перенос заряда. Электронный перенос от WSe₂ к MoS_x усиливает катализитическую активность, снижая энергетический барьер.

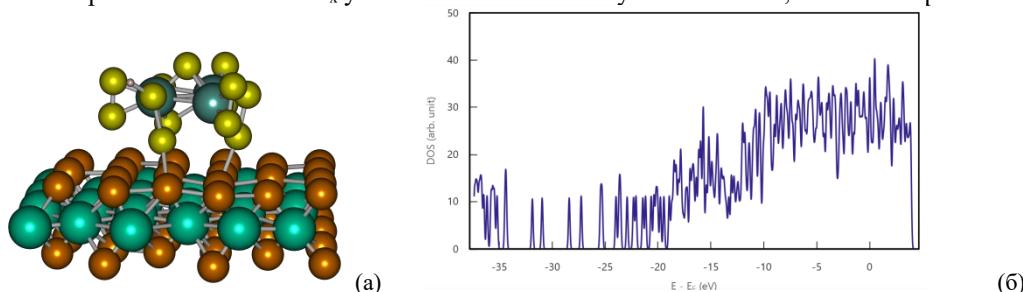


Рис. 1. (а) Модельная структура нанопленки MoS₃/WSe₂; (б) полная плотность состояний нанопленки MoS₃/WSe₂.

Для гетеропереходов MoS_x/Mo наблюдается улучшение проводимости и катализитической активности в реакциях выделения водорода благодаря упрощению переноса заряда. В случае MoS_x/WSe₂ выявлено оптимальное разделение фотогенерированных носителей заряда на интерфейсе, что способствует повышению эффективности фотоэлектрохимических процессов. Гетеропереход MoS_x/MoO_x продемонстрировал важную роль оксидных фаз в стабилизации структуры и увеличении катализитической активности путем активации дополнительных центров реакции. Структуры Mo-S-O, состоящие из комбинации Mo⁴⁺ и Mo⁵⁺, обеспечивают формирование аморфных сульфооксидных кластеров, на которых катализитический процесс протекает наиболее эффективно. Оптимизированные методы формирования пленок MoS_x различной стехиометрии позволяют минимизировать содержание субстехиометрических состояний. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования гетеропереходов MoS_x с различными материалами для создания высокоэффективных катализаторов водорода.

Список литературы

1. V.Yu. Fominskiy, M.V. Demin, R. I. Romanov, O. V. Rubinkovskaya and others // Nanomaterials 2022, Vol 12, P. 2080.

К.Н. РЫКУН, А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, В.А. КАШУРНИКОВ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия.

ВЛИЯНИЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ БАЗИСА СЛОЖНЫХ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВТСП

Рассмотрено влияние разупорядочения распределений точечных дефектов со сложным базисом в ВТСП на его магнитные свойства. Методами Монте-Карло проведено моделирование перемагничивания различных ВТСП образцов с разными параметрами разупорядочения точечных дефектов. Произведена оценка этих параметров на величину остаточной намагниченности, ширину петли перемагничивания, поле необратимости.

K.N. RYKUN, A.N. MOROZ, A.N. MAKSIMOV, V.A. KASHURNIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

INFUENCE OF DISORDERING OF THE BASIS OF THE COMPLEX DEFECT STRUCTURE ON MAGNETIC PROPERTIES OF HTS

Influence of disordering of the pinning landscapes on magnetic properties of HTS samples was investigated by Monte-Karlo modeling methods. Samples had a various pinning landscape with non-unit defect basis. Dependence of magnetic properties versus disordering parameter was estimated.

В последнее время высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) получают все большее распространение. Их используют в различных магнитных системах, в которых крайне важны магнитные свойства ВТСП материала, которые в большей степени определяются явлением пиннинга, при котором вихри Абрикосова закрепляются на дефектах сверхпроводника.

В настоящий момент одним из наиболее популярных методов получения дефектов является облучение ионами или электронами материала через специальную маску. Они являются довольно точными, однако, не идеальными: дефекты могут сдвигаться относительно их ожидаемых положений, из-за чего получаемая структура дефектов становится разупорядоченной [1]. Поэтому возникает интерес к изучению влияния этого разупорядочения на свойства ВТСП с различными структурами дефектов.

В настоящей работе проводилось моделирование перемагничивание ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с различными распределениями дефектов со сложными базисами (некоторые из них приведены на рис. 1). При этом дефекты испытывали сдвиг относительно их положений при идеальном распределении. Этот сдвиг представляет собой гауссово распределение с различными параметрами (σ). Моделирование проводилось методом Монте-Карло [2].

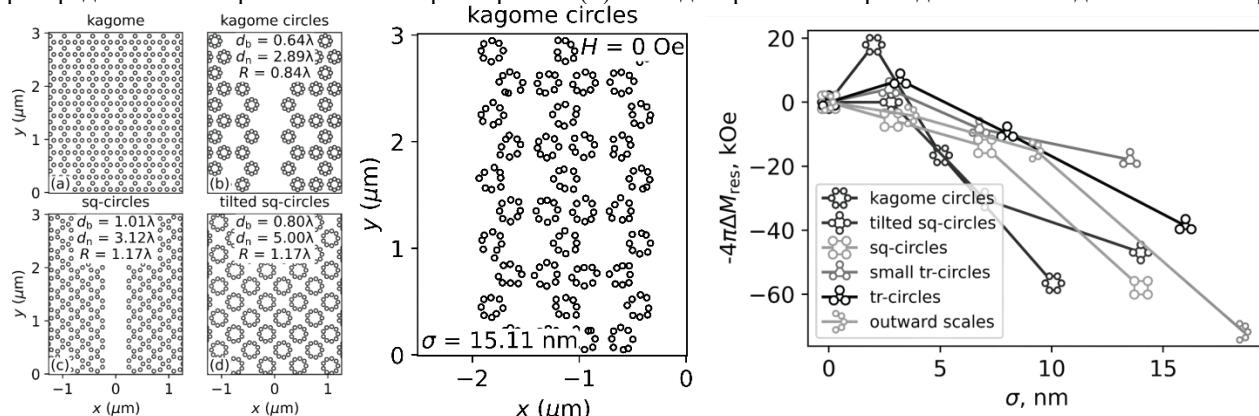


Рис. 1. (слева) Некоторые из распределений, используемых в работе. (в центре) Образец с разупорядочением с параметром σ равным 15 нм. (справа) Изменение величины остаточной намагниченности в зависимости от параметра разупорядочения.

Было показано, что при параметрах разупорядочения меньших 10 нм величина остаточной намагниченности изменяется слабо для некоторых из образцов. С ростом этого параметра падает поле необратимости всех образцов примерно на 200 Э. Это позволяет сделать вывод о негативном влиянии разупорядочения на магнитные свойства сверхпроводника. Однако это влияние оказывается существенным при относительно больших параметрах разупорядочения.

Исследование выполнено при поддержке программы НИЯУ МИФИ «Приоритет-2030».

Список литературы

- Trastoy J. et al. Tunable Flux-Matching Effects in High-T_c Superconductors with Nonuniform Pinning Arrays //Physical Review Applied. – 2015. – Т. 4. – №. 5. – С. 054003.
- Moroz A. et al. Features of Vortex Dynamics in a HTS with Disordered Pinning Lattice //Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2024. – Т. 37. – №. 2. – С. 339-353.

Н.Р. САДЫКОВ, И.Е. ШАКИРОВ

*Снежинский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,
Снежинск, Россия*

ГЕНЕРАЦИЯ МИКРОВОЛНОВОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОАКСИАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ В СРЕДЕ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНОВЫХ НАНОТРУБОК

Исследуется механизм генерации излучения, источником которого являются модулированные переменные поверхностные токи в удлиненных нанотрубках, образующих 3D-структуру. Поверхностные токи генерируются с помощью мощных коротких электрических импульсов ($x - vt$) в коаксиальном волноводе. Вытянутыми наночастицами являются углеродные нанотрубки и графеновые наноленты. Функция эффективной диэлектрической проницаемости определяется, исходя из модели Максвелла-Гарнетта с поправкой приближения Клаузиса-Моссотти.

N.R. SADYKOV, I.E. SHAKIROV

Snezhinsky Institute of Physics and Technology - branch of the National Research Nuclear MEPhI University, Snezhinsk, Russia

GENERATION OF MICROWAVE AND TERRAHERZ RADIATION IN A COAXIAL CYLINDRICAL WAVEGUIDE IN A MEDIUM BASED ON GRAPHENE NANOTUBES

We investigate the mechanism of radiation generation, whose source is modulated variable surface currents in elongated nanotubes forming a 3D structure. The surface currents are generated using powerful short electric pulses ($x - vt$) in a cylindrical waveguide. The elongated nanoparticles are carbon nanotubes and graphene nanoribbons. The effective permittivity is determined based on the Maxwell-Garnett model in the Clausius-Mossotti approximation.

Актуальная задача – генерация микроволнового и терагерцового черенковского сверхизлучения в коаксиальных цилиндрических волноводах с помощью коротких электрических импульсов [1,2], которые распространяются вдоль поверхностей цилиндров радиуса R_1 и R_2 , где $R_1 < R_2$. Токи $I(x - vt)$ распространяются вдоль цилиндрических поверхностей и имеют разное направление на внутренней и внешней трубе, причём их амплитуды равны (реализуется случай бегущей T -волны). Генерация черенковского сверхизлучения происходит в среде на основе массива нанотрубок, которые выровнены параллельно радиус-вектору в цилиндрической системе координат. Массив нанотрубок определяет эффективную электрическую функцию ϵ_{eff} (см. Рис. 1), которая представляет собой модель Максвелла-Гарнетта с поправкой Клаузиса-Моссотти (геометрическая модель массивов). При $\omega \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $R_1 = 1 \text{ cm}$, $R_2 = 3 \text{ cm}$, объемной доле $f = 5.84 \cdot 10^{-8}$, деполяризующим факторе $n_z = 2.12 \cdot 10^{-7}$, геометрическом факторе $B_z = 0.13$ и плазменной частоте $\omega_p = 7.74 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$, длине нанотрубок $l = 10 \mu\text{m}$, получено, что $\epsilon_{\text{eff}} = 1.286$; получена спектральная зависимость излучения $\Phi_\rho(\omega, \rho = R_2)$ на единицу длины коаксиального волновода (рис. 2).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{L} \Phi_\rho(t, \rho = R_2) dt = \left(\frac{1}{c \Delta z \Delta \phi \Delta \rho} \right)^2 \frac{l^2}{4 \epsilon_0} |(\mathcal{J}_0)_{\max}|^2 \frac{(R_1 + R_2)^2}{4} \int_0^\infty \chi \cdot \mathcal{H}_1(\chi) d\chi, \quad \chi = \omega \xi_0 / c, \quad \xi_0 = 3 \text{ mm}.$$

Из результатов расчетов следует, что интеграл по времени от ρ -компоненты потока энергии Φ_ρ/L через боковую поверхность цилиндра на единицу длины равняется

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_\rho(t, \rho = R_2)/L \cdot dt = 0.97 \text{ J/m}.$$

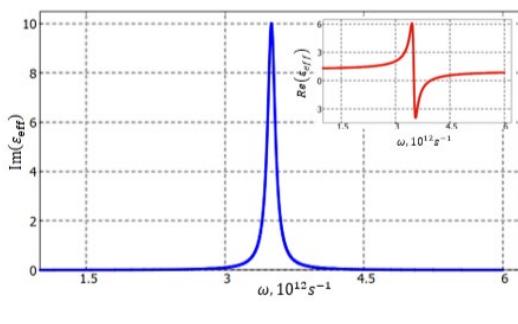


Рис. 1. Эффективная диэлектрическая функция ϵ_{eff} .

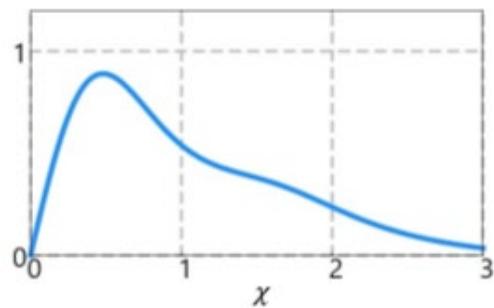


Рис. 2. Спектральная зависимость излучения $\Phi_\rho(\omega, \rho = R_2)$.

Список литературы

1. G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev and others // Appl. Phys. Lett. 2020. Vol. 116. 063501-5.
2. N.S. Ginzburg, A.W. Cross, A.A. Golovanov and others // PRL. 2015. Vol.115. 114802-5.

Е.О. СЕРОВ¹, П.С. САВЧЕНКОВ^{1,2}, А.В. РОГАЧЕВ¹, В.И. БОДНАРЧУК^{1,3,4}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴Государственный университет «Дубна», Россия

НЕЙТРОННАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

На реакторе ИР-8 (НИЦ КИ) запущен стенд рефлектометрии поляризованных нейтронов «НЕПТУН». В докладе описывается оптическая схема и приведены основные параметры установки, а также представлены результаты первых проведённых экспериментов.

E.O. SEROV¹, P.S. SAVCHENKOV^{1,2}, A.V. ROGACHEV¹, V.I. BODNARCHUK^{1,3,4}

¹National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

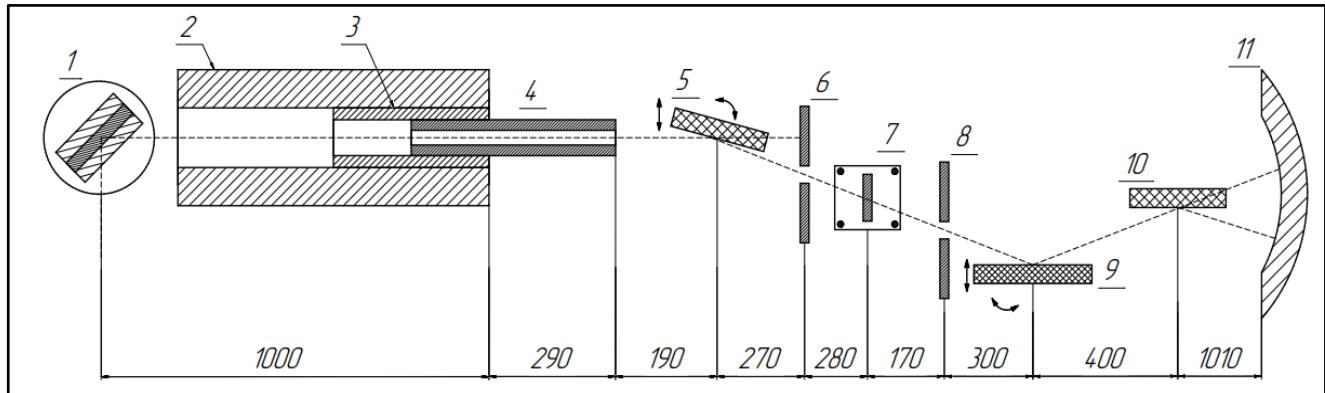
⁴Dubna State University, Russia

NEUTRON REFLECTOMETRY AT THE IR-8 REACTOR

The NEPTUNE polarized neutron reflectometry stand has been launched at the IR-8 reactor in National Research Centre Kurchatov Institute. The report describes the optical scheme and provides the main parameters of the instrument, as well as the results of the first experiments.

В Курчатовском институте на базе реактора ИР-8 был создан и введён в эксплуатацию стенд рефлектометрии с поляризованными нейтронами «НЕПТУН». На установке реализована горизонтальная плоскость отражения нейтронов от поверхности образца. Основное назначение установки – исследования тонкопленочных объектов путем определения ядерного и магнитного профилей плотности длины рассеяния. На стенде реализована схема поляризации и анализа поляризации монохроматического пучка нейтронов (рисунок 1). Она включает в себя: медный монохроматор (1), отражающий нейтроны с длиной волны $\lambda = 1,524\text{\AA}$; биологическую защиту монохроматора (2); коллиматор (3) с установленной в него вставкой (4) с щелью 1 мм; два суперзеркала Fe/Si ($m=3,6$), установленных на подвижных основаниях – поляризатор (5) и анализатор (6); спин-флиппер Мезея (7); регулируемые диафрагмы (8, 9); узел образца (9) с возможностью перемещения в трёх осях; одномерный гелиевый позиционно-чувствительный детектор (11).

Рис. 1. Оптическая схема стенд «НЕПТУН»: 1 — медный монохроматор; 2 — биологическая защита монохроматора; 3 —



коллиматор; 4 — вставка в коллиматор; 5, 10 — поляризующие суперзеркала Fe/Si; 6, 8 — регулируемые диафрагмы; 7 — спин-флиппер Мезея; 11 — одномерный гелиевый позиционно-чувствительный детектор.

Стенд предназначен для исследования методом нейтронной рефлектометрии тонких пленок толщиной от 10 нм до 200 нм с характерным размером образцов от $30 \times 30 \text{ mm}^2$ до $90 \times 200 \text{ mm}^2$. При использовании неполяризованных нейтронов стенд позволяет решать задачи по определению толщин слоев и шероховатостей межслойных границ в тонкопленочных структурах, исследовать распределение водорода в слоях, изучать образование и рост оксидных пленок, образующихся в процессе роста тонких пленок и проводить исследования образцов с использованием изотопического контраста. Использование поляризованных нейтронов значительно расширяет возможности прибора и позволяет исследовать магнитные образцы с послойным определением величины и направления вектора намагниченности.

В докладе будет рассмотрена оптическая схема стенд, особенности реализации метода на реакторе ИР-8, а также представлены результаты первых экспериментов, выполненных на установке.

Н.Н. СИТНИКОВ, С.В. ГРЕШНЯКОВА, И.А. ЗАЛЕТОВА
АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ В СЛОИСТЫХ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТАХ СПЛАВА $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

Экспериментально исследовано влияние электроимпульсной обработки (ЭИО) на микроструктуру быстрозакалённых слоистых аморфно-кристаллических лент сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$. Получена и исследована последовательная серия образцов лент после ЭИО единичным импульсом электрического тока длительностью 1 мс с повышением степени разогрева до и после достижения температуры кристаллизации аморфной части лент.

N.N. SITNIKOV, S.V. GRESHNYAKOVA, I.A. ZALETOVA
SSC «Keldysh Research Center», Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF CRYSTALLINE PHASE FORMATION IN LAYERED AMORPHOUS-CRYSTALLINE RIBBONS OF $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ALLOY DURING ELECTRIC PULSE TREATMENT

The effect of electric pulse treatment (EPT) on the microstructure of rapidly quenched layered amorphous-crystalline ribbons of $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ alloy was experimentally investigated. A sequential series of tape samples after EPT with an increase in the degree of heating before and after reaching the crystallization temperature of the amorphous part of the ribbons was obtained and investigated.

Материалом для исследований были выбраны слоистые аморфно-кристаллические ленты, полученные методом спиннингования расплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ на быстровращающемся медном диске. В результате закалки расплава, происходящего со скоростью охлаждения расплава около $4 \cdot 10^5$ К/с, получены тонкие ленты толщиной около 40 мкм и шириной около 1,5 мм в аморфно-кристаллическом состоянии. Быстрозакалённые слоистые аморфно-кристаллические ленты могут быть дополнительно подвергнуты различным обработкам для получения новых свойств и модификации уже имеющихся эффектов памяти формы. Одним из перспективных вариантов термообработки без температурной выдержки является электроимпульсная обработка (ЭИО), которая заключается в пропускании через образец (ленту) единичного или серии коротких импульсов электрического тока. Электрический ток позволяет разогревать тонкомерные образцы за короткие времена и проводить кристаллизацию практически без изотермической выдержки. ЭИО осуществлялась на лабораторной установке, в которой реализовано пропускание через обрабатываемый образец ленты одиночного импульса электрического тока с заданной амплитудой и длительностью. Применяемый метод обработки и лабораторная установка позволяют дозировано разогревать обрабатываемый образец ленты за времена от 0,1 до 100 мс. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии при скорости нагрева 10 °C/мин была определена температура кристаллизации аморфной части ленты, которая составила 454 °C. В соответствии с расчётной формулой для нагрева полученных образцов лент длиной около 20 мм до температуры кристаллизации за 1 мс необходимо обеспечить плотность тока (J) около 819 A/mm². Была получена последовательная серия экспериментальных образцов, полностью или частично кристаллизованных при J от 680 до 891 A/mm². По проведённым отжигам было отмечено, что из-за индивидуальных характеристик образцов лент, полученные при одинаковых режимах ЭИО образцы различаются внешним видом и характеристиками.

Исследования микроструктур поперечных сечений полученных экспериментальных образцов показали, что исходная лента характеризуется слоистой аморфно-кристаллической структурой с кристаллическим слоем толщиной около 10 мкм, а толщина аморфного слоя составляет около 30 мкм. При ЭИО в зависимости от степени вкладываемой энергии в обработанных образцах лент наблюдается изменение исходной микроструктуры. При J менее 758 A/mm² в аморфном слое не наблюдается образование новых кристаллических фаз. Кристаллический слой также не претерпевает заметных структурных изменений. С увеличением J более 775 A/mm² в аморфном слое формируется кристаллическая фаза, которая начинает образовываться преимущественно от границ аморфного слоя, при этом также наблюдаются крупные кристаллы во внутренней части ленты. При $J = 784$ A/mm² и более в поперечном сечении ленты наблюдается кристаллическая микроструктура с неоднородным распределением кристаллов по толщине: вблизи поверхностей ленты формируется структура из столбчатых кристаллов, а в объеме ленты присутствуют единичные или сгруппированные крупные кристаллы. При $J = 891$ A/mm² доля столбчатых кристаллов, соприкасающихся в средней части превалирует, между столбчатыми кристаллами в средней части ленты встречаются единичные линзообразные кристаллы.

В результате установлено, что увеличение энергии импульса ЭИО и перегрева после кристаллизации аморфного состояния приводит к формированию более однородной кристаллической структуры, характеризующейся преимущественно столбчатыми кристаллами.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 24-22-00035).

В.Г. СРЕДИН¹, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ², А.П. МЕЛЕХОВ³, Р.Ш. РАМАКОТИ³, А.А. СТЕПАНЕНКО³,
К.С. АНДРЕЙЧИКОВ⁴

¹Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

⁴АО «МЗ «Сапфир», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ПОВЕРХНОСТНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК – АНТИМОНИД ИНДИЯ

Рассмотрены процессы, протекающие в структурах поверхностный окисел – антимонида индия под действием мягкого рентгеновского излучения. Показано, что облучение приводит к генерации радиационных дефектов на поверхности кристалла.

V.G. SREDIN¹, A.V. VOITSEKHOVSKY², A.P. MELEKHOV³, R.S. RAMAKOTI³, A.A. STEPANENKO³, K.S. ANDREICHIKOV⁴

1. Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great, Balashikha, Russia

2. National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

3. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

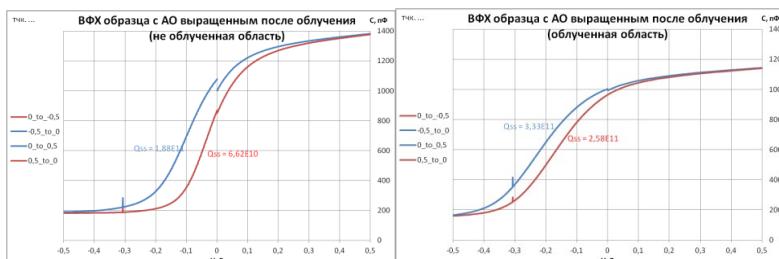
4. JSC MH Sapphire, Moscow, Russia

INFLUENCE OF SOFT X-RAY RADIATION ON PROPERTIES OF INTERFACE BETWEEN DIELECTRIC SURFACE – INDIA ANTIMONIDE

The processes occurring in the structures of surface oxide-indium antimonide under the influence of soft X-ray radiation are considered. It is shown that irradiation leads to the generation of radiation defects on the surface of the crystal.

Ранее было показано, что мягкое рентгеновское излучение (MRI) приводит к модификации свойств поверхности и структур диэлектрический слой-поверхность полупроводника на примере монокристаллов и эпитаксиальных слоев узкозонных полупроводников InSb [1,2]. В указанных работах поверхности исследуемых образцов подвергались облучению MRI лазерной плазмы, в дальнейшем на поверхность наращивался окисный диэлектрический слой и измерялись вольт-фарадные характеристики (ВФХ) структур. Из их анализа было установлено, что в Cd_xHg_{1-x}Te MRI генерирует поверхностные дефекты.

В настоящей работе исследовалось влияние MRI на структуры диэлектрический поверхностный слой – антимонид индия электронного типа проводимости. Поверхностный диэлектрик состоял из двух слоев – собственного анодного окисла толщиной 0.5 мкм, поверх которого напылялся слой окислов кремния такой же толщины. В качестве источника использовалось MRI плазмы малоиндуктивного искрового разряда [1,3]. Инициация разряда проводилась с помощью сфокусированного излучения импульсного Nd:YAG лазера. Спектральный диапазон MRI составлял 0.1–8 кэВ с максимумом в области 2–4 кэВ. Длительность рентгеновского импульса $\Delta t \leq 20$ нс. Максимальная доза облучения до 1.5 Дж/см². Облучение проводилось при 300К. На рисунке показаны ВФХ структур до и после облучения с дозой до 0.5 Дж/см².



Rис. 1. ВФХ структур до (а) и после (б) облучения MRI с дозой порядка 0.5 Дж/см²

Изменение вида характеристик (наклона кривых) свидетельствует об изменении зарядового состояния поверхности, вызванное генерацией поверхностных дефектов. Измерения показывают наличие дозовой зависимости – степень модификации вида кривых увеличивается с ростом дозы, т.е. дефекты носят радиационный характер. Аналогичные результаты наблюдались и в Cd_xHg_{1-x}Te [1]. К сожалению, определить концентрацию и тип дефектов по настоящим измерениям не представляется возможным. Природа возникновения дефектов подобного типа в настоящее время не выяснена [4].

Список литературы

- Средин В.Г, Войцеховский А.В., Ананьин О.Б. Мелехов А.П., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. Прикладная физик № а. 2018. №4. С.54-60.
- Средин В.Г., Войцеховский А.В., Степаненко А.А., Мелехов А.П., Рамакоти Р.Ш., Юрчак В.И., Дзядух С.М., Андрейчиков К.С. В сборнике: Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023. Сборник трудов X Международной научно- практической конференции. Томск, 2023. С. 296 – 297.
- Баловнев А.В., И.Г. Григорьева, Г.Х. Салахутдинов. ПТЭ, 2018, № 1, с. 84-86.
- Вавилов В.С. УФН. 1997. Т. 167. № 4. С. 407-412.

И.С. СТЕПАНОВ, Л.И. БУДАЕВА, С.В. СТЕПАНОВ

НИЦ Курчатовский институт – Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

КОГДА ПРОИСХОДИТ ПОГЛОЩЕНИЕ СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ЛЬДА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ?

Показано, что во льду накопление структурных дефектов, связанных с поглощением скрытой теплоты плавления при отрицательных температурах не происходит. Поглощение скрытой теплоты начинается только при небольшом перегреве (несколько десятых градуса Цельсия) внешней поверхности льда, что отражается на вариации временных аннигиляционных параметров позитронов в тающем льду.

I.S. STEPANOV, L.I. BUDAeva, S.V. STEPANOV

NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

WHEN DOES THE ABSORPTION OF LATENT HEAT OCCUR IN THE ICE MELTING FROM A VIEWPOINT OF THE POSITRON ANNIHILATION SPECTROSCOPY?

It is shown that the accumulation of structural defects in ice associated with the absorption of latent heat of fusion at negative temperatures does not occur. Absorption of latent heat begins only at slight overheating (several tenths of a degree Celsius) of the outer surface of the ice, which is reflected in the variation of positron annihilation lifetime parameters in melting ice.

Позитронная аннигиляционная спектроскопия хорошо зарекомендовала себя в качестве метода исследования структурных дефектов вакансационного типа в твердых телах. Это связано с тем, что именно в таких дефектах происходит локализация позитронов, причем их время жизни зависит от типа и концентрации присущих дефектов [1]. Чтобы исследовать кинетику накопления структурных дефектов при приближении к точке плавления мы провели измерения временных аннигиляционных спектров во льду при разных температурах (-7.6...0 °C) в квазистатических условиях, а также при малых перегревах поверхности льда (рис. 1).

При пониженных температурах (от -7.6 до -0.35 °C) было заметно небольшое увеличение времени жизни, τ_2 , долгоживущей компоненты. Вероятно, это связано с разрыхлением аморфных областей льда, т.е. областей между

ветвями его дендритного скелета. Именно в этих областях (с большей долей свободного объема) локализуется атом позитрона. Затем была установлена температура 0 °C (170 часов от начала измерений). Спектры записывались в течение трех суток, но изменений в них замечено не было. Это выглядит естественно, так как вся система находится в равновесии (при постоянной T), тепловые потоки отсутствуют, плавление еще не началось. Далее температура была увеличена на 0.1 °C, плавление началось, но достаточно медленно. Во льду начался процесс дефектообразования.

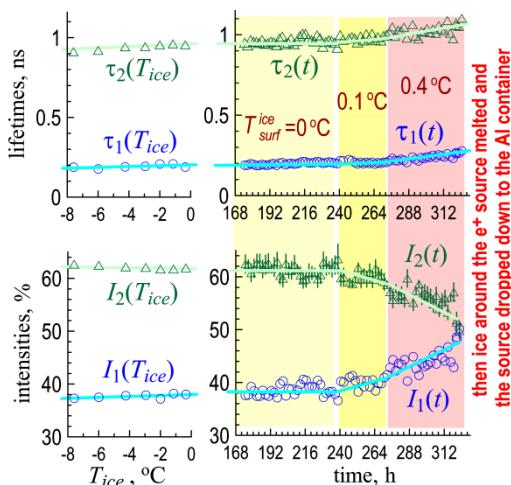


Рис. 1. Параметры двухэкспоненциального разложения временных аннигиляционных спектров льда: слева – интенсивности и времена жизни e^+ в зависимости от температуры льда, а справа – в зависимости от времени измерения при разных перегревах поверхности льда. Долгоживущая компонента ассоциируется с ортопозитронием, а короткоживущая с аннигиляцией «свободных» позитронов и внутренней аннигиляцией парапозитронов.

Накопление дефектов снижает подвижность как термализованного позитрона, так и трековых электронов. Поэтому вероятность образования Ps, $\sim I_2$, уменьшается, а доля аннигиляций позитронов в «свободном» состоянии растет. После 40 часов измерений величина перегрева поверхности льда была увеличена до 0.4 °C. Процесс дефектообразования и плавления пошел быстрее, что хорошо видно по параметрам аннигиляционных спектров.

В результате показано, что накопление структурных дефектов, связанных с поглощением скрытой теплоты плавления при отрицательных температурах не происходит. Поглощение скрытой теплоты плавления начинается только при небольшом перегреве внешней поверхности льда.

Список литературы

1. I.S. Stepanov, L.I. Budaeva, S.V. Stepanov // “Estimation of the Thickness of Ice Melting Front by Studying the Kinetics of Ice Ball Melting in Air” Colloid Journal, 2024, Vol. 86, № 3, P. 448-455 DOI: 10.1134/S1061933X24600179.

С.В. СТЕПАНОВ^{1,2}, Л.Ю. ДУБОВ^{1,2}, О.В. ИЛЮХИНА¹, Ю.В. ШТОЦКИЙ^{1,2}, Ю.А. АКМАЛОВА², Л.И. БУДАЕВА¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ПОЗИТРОННАЯ ДИАГНОСТИКА FE-GA СПЛАВОВ

В настоящей работе исследована динамика дефектов вакансационного типа в сплавах Fe-Ga (галфенолах) с содержанием галлия от 16,5 до 33%. Методы спектроскопии времени жизни аннигиляции позитронов (PALS), нейтронной дифракции и рентгеновской дифракции (XRD) показывают высокую степень корреляции в изменениях времени жизни позитронов и фазового состава образцов. Сравнение позитронных данных и результатов структурного анализа показывает различное поведение упорядочения дефектов в сплавах с содержанием галлия x выше и ниже 25%. Все исследованные сплавы, закаленные при 1000°C, демонстрируют высокую концентрацию моновакансий железа ($> 2 \cdot 10^{-4}$ ат.⁻¹). Оказалось, что время жизни в моновакансиях линейно изменяется от ~160 пс при $x = 16.5$ до ~180 пс при $x = 33$. Теоретические оценки времени жизни позитронов в моновакансиях в зависимости от числа атомов N_{Ga} в ближайшем окружении дают времена от 183 пс при N_{Ga} = 0 до 198 пс при N_{Ga} = 8. Для объяснения экспериментальных результатов предложена модель вакансационно-углеродных комплексов.

S.V. STEPANOV^{1,2}, L.YU. DUBOV^{1,2}, O.V. ILYUKHINA¹, YU.V. SHTOTSKY^{1,2},
YU.A. AKMALOVA², L.I. BUDAeva¹

¹NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

POSITRON DIAGNOSTICS OF Fe-Ga ALLOYS

In the present work we study dynamics of vacancy-type defects in Fe-Ga alloys (galfenols) with gallium content ranging from 16.5 to 33%. Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS), Neutron Diffraction and X-Ray Diffraction (XRD) methods shows a high degree of correlation in changes in the positron lifetime and phase composition of the samples. A comparison of positron data and the results of structural analysis reveal notably different behavior of defects ordering in alloys with gallium content x higher and lower than 25%. All the alloys quenched at 1000°C demonstrate high concentration of iron monovacancies ($> 2 \cdot 10^{-4}$ at.⁻¹), and positron lifetime linearly grows from ~160 ps at $x=16.5\%$ to ~180 ps at $x = 33\%$. The observed changes in the lifetime of defects correlate with the number of N_{Ga} atoms in the nearest environment of vacancy, but theoretical estimation shows that lifetime have to be ranging from 183 ps at N_{Ga}=0 to 198 ps at N_{Ga}=8. To explain the obtained experimental results, a model of vacancy-carbon complexes is proposed.

FeGa-сплавы (галфенолы) относятся к магнитострикционным материалам, в которых изменение намагниченности приводит к изменению их линейных размеров. Галфенолы нашли широкое применение в высокотехнологичных отраслях промышленности: из них изготавливают датчики давления, сенсоры и мощные гидролокаторы, приводы для прецизионных станков, активные антивibrационные системы и др. Магнитные и механические свойства этих сплавов сильно зависят от атомного упорядочения и концентрации точечных дефектов.

В докладе приведены результаты исследования динамики дефектов вакансационного типа, полученные методом спектроскопии времени жизни позитронов (PALS) - одним из наиболее чувствительных методов исследования структуры дефектов. В исходных закаленных образцах время жизни позитронов составляет 160-180 пс (характерное для моновакансий) в то время, как в бездефектной решётке Fe₃Ga время жизни составляет ~115 пс. На рис. 1 представлено изменение среднего времени жизни $\langle\tau_m\rangle$ при повышении температуры отжига (T_{отж}) Fe-Ga сплавов при доле Ga от 16.5% до 33.0%.

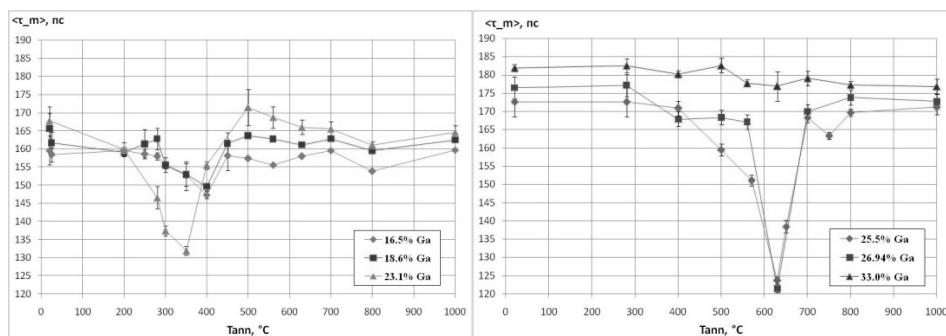


Рис. 1. Зависимость τ_m от T_{отж} Fe-Ga сплавов при содержании Ga 16.5 - 23.1 % (слева) и 25.5 - 33.0 % (справа)

Список литературы

1. Golovin I.S., Dubov L.Yu., Shtotsky Yu.V and others //Materials Letters 2016. Vol. 171, P. 46-49.

К.А. СУРНИНА, А.А. МИХАЙЛОВ, Д.А. АБИН, А.Ю. МАЛЯВИНА, К.А. БОРОДАКО
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА КОАКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА МИКРОПИНЦЕТА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

В работе представлена схема с коаксиальным контактом для нагрева микропинцета из сплава с эффектом памяти формы. Для создания коаксиального контакта собрана установка для магнетронного осаждения тонких пленок. Проведено напыление пленок из меди, никеля и алюминия. Измерена толщина пленок с помощью профилометра. Разработана схема измерения сопротивления тонких пленок методом Ван дер Пау.

K.A. SURNINA, A.A. MIKHAILOV, D.A. ABIN, A.Y. MALYAVINA, K.A. BORODAKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A COAXIAL HEATING SYSTEM FOR SHAPE MEMORY MICROTWEEZERS

The paper presents a scheme with a coaxial contact for heating tweezers made of TiNiCu alloy. To create a coaxial contact, a setup for magnetron deposition of thin films was assembled. Films of copper, nickel and aluminum were deposited. The thickness of the films was measured using a profilometer. A scheme for measuring the resistance of thin films using the Van der Pauw method was developed.

Для решения современных технических задач возникает потребность в создании микро- и наноинструментов для манипулирования объектами, размер которых не превышает нескольких микрометров. В последнее время создаются микро- и нанопинцеты из сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) [1]. Для применения таких пинцетов требуется обеспечить их нагрев. Показана эффективность нагрева инструментов с помощью пропускания электрического тока [2]. Для этого необходим замкнутый контур, который, как правило, реализуется с использованием двухконтактной схемы. Однако существует проблема низкой механической прочности таких схем на микро и наномасштабах.

Разработана альтернативная схема с локальным нагревом пинцета (рис. 1), состоящая из вольфрамовой иглы диаметром 500 мкм с коаксиальной конфигурацией контакта. Конец иглы сначала покрывается слоем диэлектрического или полупроводникового материала толщиной от 100 нм до 1 мкм, а затем слоем проводящего материала толщиной от 100 нм до 1 мкм так, чтобы отсутствовал электрический контакт между проводящим слоем и иглой. Инструмент с ЭПФ закрепляется на конце иглы с помощью ионно-стимулированного осаждения металла (платины), формируя замкнутый электрический контур.

Для создания тонкого проводящего слоя, входящего в схему с коаксиальным контактом, использовался метод магнетронного осаждения. Была разработана и собрана установка, состоящая из магнетрона EdwardsScancoatSixSputterCoater и охлаждающего контура. Были изготовлены электроды-мишени из меди, никеля и алюминия, которые напылялись на стеклянную подложку. Толщина полученных пленок измерялась с помощью профилометра Dektak 150. Для измерения сопротивления пленок была разработана экспериментальная установка на основе четырехконтактного метода Ван дер Пау [3], позволяющая минимизировать возможность повреждения поверхности пленки.

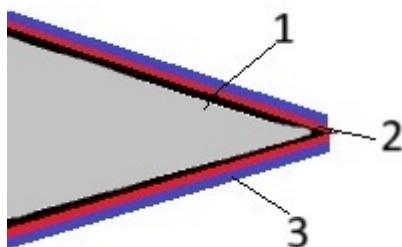


Рис. 1. Коаксиальная система нагрева устройства с ЭПФ: 1 – вольфрамовая игла, 2 – слой диэлектрика/полупроводника, 3 – проводящий слой.

Работа была частично поддержана Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352).

Список литературы

1. Shelyakov A., Sitnikov N., Borodako K. and others // J. Micro-Bio. Robot. 2020. Vol. 16. P. 43-51.
2. Прокунин А. В., Коледов В. В., Шавров В. Г. и др. // Патент № 2790934. 2023.
3. Oliveira F. S., Cipriano R. B., Da Silva F. T. and others // Sci. Rep. 2020. Vol. 10, № 1. 16379.

Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, А.Н. УРАКОВ,

В.Х. ХАЛМУХАМЕДОВА, С.Т. ГУЛЯМОВА

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

ИЗУЧЕНИЕ ЭМИССИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК MgO ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ АКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ

Выявлены основные механизмы изменения эмиссионных и оптических свойств MgO в процессе ионной имплантации и последующего отжига.

D.A. TASHMUKHAMEDOVA, B.E. UMIRZAKOV, M.B. YUSUPJANOVA, A.N. UROKOV,
V.X. XALMUXAMEDOVA, S.T. GULYAMOVA

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

INVESTIGATION OF EMISSION AND OPTICAL PROPERTIES OF MgO FILMS IMPLANTED WITH ACTIVE METAL IONS

The main mechanisms of changes in the emission and optical properties of MgO during ion implantation and subsequent annealing have been identified.

Оксиды металлов перспективны в различных областях электроники и электронной техники [1,2], в частности, фотоэлектрических приборах, ультрафиолетовых фотодетекторах, датчиках, тепловых и электрических изоляторах, полупроводниках, добавках к топливным элементам, антимикробных материалах, оптической электронике и наноэлектронике. Нами ранее изучены процессы образования наноразмерных фаз на поверхности SiO₂ и CaF₂ при имплантации ионов [3, 4].

Однако до сих пор не проводились исследования по получению на поверхности пленок MgO наноразмерных фаз и пленок с использованием метода ионной имплантации. Практически не были изучены состав, кристаллическая и электронная структура, эмиссионные и оптические свойства тонких пленок оксидов Mg с наноразмерными структурами. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований по влиянию низкоэнергетической имплантации ионов Ba⁺ и Na⁺ на физические свойства пленок MgO/Mg.

Все технологические воздействия (окисление Mg, температурная обработка, ионная имплантация) и исследования состава, электронной структуры и физических свойств проводились в одном и том же сверхвысоковакуумном приборе. Пленки MgO получены методом термического окисления Mg.

Перед исследованиями система MgO/Mg обезгаживалась при T = 800 К в течении 2 – 3 часов. Имплантация ионов Ba⁺ и Na⁺ проводилась с энергией E₀ = 1 кэВ при дозе насыщения D = 6·10¹⁶ см⁻² в вакууме 5·10⁻⁷ Па при комнатной температуре. Состав, структура и физические свойства ионно-имплантированного образца начинают с D = 6·10¹⁶ см⁻² существенно не меняются, т.е. эта доза является дозой насыщения D_n. В таблице 1 приведены эмиссионные параметры пленок MgO/Mg с толщиной d = 800 Å, до и после имплантации ионов. Где, σ_m – максимальное значение σ, λ – глубина выхода истинно-вторичных и фотоэлектронов.

Таблица 1.

Эмиссионные параметры MgO до и после имплантации ионов Ba⁺ и Na⁺ с E₀=1 кэВ, D=6·10¹⁶ см⁻²

Объект исследования	σ _m	E _{pm} , эВ	η при (E _p = 500 эВ)	Υ при hν = 10,8 эВ	λ, Å
MgO	3,9	800	0,22	3·10 ⁻⁴	400
Ba ⁺ →MgO	7,2	1000	0,32	6·10 ⁻⁴	600
Na ⁺ →MgO	8,1	1000	0,25	7·10 ⁻⁴	600

Видно, что после ионной имплантации значения σ_m, Υ и λ заметно увеличиваются. Это объясняется тем, что в ионно-имплантированном слое образуются соединения типа Mg – O, Me – O, Mg – Me – O, а также несвязанные атомы Mg и Me (Ba или Na). При этом на поверхности образуются избыточные атомы Ba (Na) с толщиной 0,5 – 0,6 монослоя, что приводит к уменьшению работы выхода поверхности. По-видимому, эмиссионная эффективность соединений Ba + O и Ba + Mg + O заметно больше, чем эмиссионная эффективность MgO. Все это приводит к заметному увеличению глубины выхода истинно-вторичных и фотоэлектронов, следовательно, значения σ_m и Υ увеличиваются до 1,5 – 2 раза (см. табл. 1).

Список литературы

1. Balakrishnana G., Velavana R., Batoob K.M., Raslan E.H. // Results Phys. 2020. Vol.16. Article 103013.
2. Lu D., Jiang Q., Ma X., Wang K., Fu X., Huang Y., Hou B. // Mater. Charact. 2021. Vol. 173. Article 110955.
3. Юсупжанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 4. С. 148.
4. Umirzakov B.E., Pugacheva T.S., Tashatov A.K., Tashmuhamedova D.A. // NIM – B. 2000. Vol. 166-167. P. 572.

М.П. ТЕЛЕНКОВ, Ю.А. МИЯГИН

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

ТЕОРИЯ НЕРАВНОВЕСНОГО РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ИЗ КВАНТОВЫХ ЯМ В КВАНТУЮЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Разработана теория последовательного резонансно-туннельного транспорта в периодических структурах из квантовых ям в квантующем магнитном поле, позволяющая рассчитать населенности уровней Ландау в ямах в процессе резонансного туннелирования. Исследовано распределение электронов по уровням Ландау квантовых ям в периодических структурах на основе GaAs/AlGaAs при протекании по структуре стационарного резонансно-туннельного тока.

M.P. TELENKOV, YU.A. MITYAGIN

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

THEORY OF NON-EQUILIBRIUM RESONANT-TUNNELING TRANSPORT IN PERIODIC QUANTUM WELL STRUCTURES IN A QUANTIZING MAGNETIC FIELD

The theory of sequential resonant-tunneling transport in periodic quantum well structures in a quantizing magnetic field was developed, which makes it possible to calculate the populations of Landau levels in the wells in the process of resonance tunnelling. The distribution of electrons over the Landau levels of quantum wells was studied in periodic GaAs/AlGaAs-based structures for the stationary resonance-tunneling current flowing through the structure.

Квантующее магнитное поле приводит к изменению характера энергетического спектра электрона в квантовой яме – вместо непрерывных двумерных подзон размерного квантования формируются дискретные серии уровней Ландау, каждый из которых имеет макроскопически большую кратность вырождения. В квантующем магнитном поле энергия Ландау превышает уширение уровней, что приводит к существенному подавлению межуровневых упругих и квазиупругих процессов рассеяния (на примесях, шероховатости гетерограниц и акустических фонах). Одновременно с этим из-за высокой плотности состояний электронов на уровнях Ландау существенно возрастает интенсивность электрон-электронного рассеяния, которое становится доминирующим процессом перераспределения электронов по уровням Ландау. Это приводит к необычной кинетике релаксации в системе уровней Ландау, лежащих ниже энергии оптического фона [1,2]. Соответственно, можно ожидать, что квантующее магнитное поле изменяет физическую картину кинетических явлений, протекающих в электронной подсистеме структур из квантовых ям.

Данная работа посвящена изучению в квантующем магнитном поле одного из таких важных кинетических явлений – резонансно-туннельного транспорта в периодических структурах из квантовых ям. Наши исследования [1,2] показали, что квантующее магнитное поле приводит к существенному замедлению релаксации вследствие качественного изменения ее механизма. В результате время релаксации становится сопоставимо со временем туннелирования. Это приводит к тому, что становится неприменим основной метод описания таких систем – метод последовательного туннелирования [3], который предполагает, что время туннелирования настолько больше времени релаксации, что распределение электронов в каждой яме можно считать равновесным с температурой кристаллической решетки.

В данной работе построена теория последовательного резонансно-туннельного транспорта, в которой не делается предположение о распределении электронов по уровням Ландау, а само это распределение рассчитывается в условиях протекания туннельного тока по структуре. Используя разработанную теорию, были рассчитаны населенности уровней Ландау в сверхрешетках в условиях стационарного резонансно-туннельного транспорта, обеспечивающего накачку уровней Ландау верхней подзоны, лежащих ниже энергии оптического фона. Показано, что в условиях резонансно-туннельной накачки верхней подзоны электронный газ в квантовых ямах является сильно неравновесным – в каждой из подзон устанавливается квазибильцмановское распределение электронов по уровням Ландау со своей эффективной температурой, на порядок превышающей температуру кристаллической решетки. Более того, в широком непрерывном диапазоне значений магнитного поля формируется инверсная населенность межподзонного перехода между уровнями Ландау (2,0) и (1,1), частоту которого можно перестраивать, изменяя напряженность магнитного поля.

Список литературы:

1. M.P. Telenkov, Yu.A. Mityagin, et al.// JETP Letters 102 (2015) 678.
2. Yu.A. Mityagin, M.P. Telenkov, et al.// Physica E 142(2022)115288.
3. A. Wacker//Physics Reports 357(2002) 1.

М.А. ТОМАЕВА¹, В.Д. НЕВЕРОВ^{1,2}, А.В. КРАСАВИН^{1,2}, А.В. КАЛАШНИКОВ¹,
А.В. ВАГОВ², М.Д. КРОИТОРУ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЙ

В работе рассмотрена зависимость сверхпроводящего эффекта близости от геометрии контакта сверхпроводник – нормальный металл. Показано существенное влияние кривизны контакта на закон затухания сверхпроводящих корреляций в нормальной области и определены характерные длины эффекта близости в случае чистого и грязного металла.

М.А. TOMAYEVA¹, V.D. NEVEROV^{1,2}, A.V. KRASAVIN^{1,2}, A.V. KALASHNIKOV¹,
A.V. VAGOV², M.D. CROITORU²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

SUPERCONDUCTING PROXIMITY EFFECT FOR DIFFERENT GEOMETRIES

The work examines the dependence of the superconducting proximity effect on the geometry of the superconductor – normal metal contact. It shows a significant influence of the contact curvature on the law of decay of superconducting correlations in the normal region and determines the characteristic lengths of the proximity effect in the case of clean and dirty metal.

При контакте сверхпроводника (S) и нормального металла (N) куперовские пары могут проникать из сверхпроводящей области в нормальную. Это приводит к тому, что малая область нормального металла вблизи SN-границы становится сверхпроводящей. Этот феномен называется эффектом близости.

В нормальном металле, вследствие отсутствия притягивающего электрон-электронного взаимодействия, куперовские пары разрушаются на некотором расстоянии от SN-границы, которое называется длиной когерентности:

$\xi_n = \frac{\hbar v_n}{2\pi k_B T}$ в чистых и $\xi_n = \sqrt{\frac{\hbar D_n}{2\pi k_B T}}$ в грязных металлах, где D_n - коэффициент диффузии электронов, v_n – ферми-скорость, T - температура. При температурах близких к критической сверхпроводящие корреляции в нормальном металле убывают по экспоненциальному закону: $F = F_0 e^{-\frac{r}{\xi_n}}$, где r – расстояние от SN границы. Однако при низких или нулевой температурах этот закон становится степенным.

Рассматриваемая в работе система представляет собой прямоугольную решетку (рис 1) со сторонами $64a \times 128a$, где a – параметр решетки. Границные условия – нулевые. Пластина разделена на две фазы: сверхпроводящую (S) и нормальную (N). Граница раздела фаз имеет параболическую форму $x = l + \eta * \left(y - \frac{l}{2}\right)^2$, где η – варьируемый параметр кривизны.

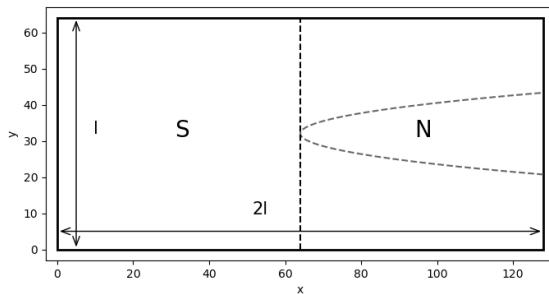


Рис. 1. Геометрия системы. S – сверхпроводящая фаза, N – нормальная фаза, $l = 64a$

Гамильтониан системы на основе модели сильной связи при помощи метода среднего поля был преобразован в уравнения Боголюбова – де Жена (БдЖ), которые были решены при помощи цикла самосогласования по параметру порядка.

Показано, что сростом варьируемого параметра η , который отвечает за кривизну SN-контакта, характерная длина проникновения сверхпроводящих корреляций в нормальном металле увеличивается, при этом их значение на границе контакта растет. Степень затухания максимальна в предельном случае $\eta = 0$ (отсутствие кривизны). Эффект подавления сверхпроводящих корреляций в присутствии беспорядка в нормальной области практически исчезает в системах с положительной кривизной, в то время как в случае $\eta = 0$ степень затухания сверхпроводящих корреляций существенно растет.

У.Б. УЛЖАЕВ¹, А.Н. УЛУКМУРАДОВ², У.Б. ХАЛИЛОВ¹

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

²Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Ташкент, Узбекистан

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ УДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИ АДСОРБИРОВАННОГО ВОДОРОДА В ЭНДОЭДРАЛЬНОМ ОУНТ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Водородная энергетика рассматривается как перспективная альтернатива традиционным источникам энергии благодаря своей возобновляемости, эффективности и экологической чистоте [1]. В последние годы для хранения водорода всё чаще используются углеродные материалы, в частности углеродные нанотрубки (УНТ), благодаря их химической и термической стабильности [2]. Несмотря на различные экспериментальные и теоретические исследования, посвящённые хранению водорода в этих структурах путём физической и химической адсорбции, показатель хранения водорода при комнатной температуре (и нормальном давлении) остаётся низким. В этом исследовании, основанном на симуляциях, была изучена роль эндодральных атомов никеля в хранении водорода в однослойных углеродных нанотрубках (ОУНТ) с использованием метода реактивной молекулярной динамики (MD) [3].

U.B. ULJAYEV¹, A.N. ULUKMURADOV², U.B.KHALILOV¹

¹Institute of Ion-Plasma and Laser Technology of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan

²Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Tashkent, Uzbekistan

HIGH-TEMPERATURE RETENTION OF CHEMICALLY ADSORBED HYDROGEN IN ENDOHEDRAL NICKEL-BASED SWCNT

Hydrogen energy is considered as a promising alternative to traditional energy sources due to its renewable nature, efficiency and environmental friendliness. In recent years, carbon materials, in particular carbon nanotubes, have been increasingly used to store hydrogen due to their chemical and thermal stability. Despite various experimental and theoretical studies devoted to hydrogen storage in these structures by physical and chemical adsorption, the hydrogen storage rate at room temperature (and normal pressure) remains low. In this simulation-based study, the role of endohedral nickel atoms in hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes was investigated using the reactive molecular dynamics method.

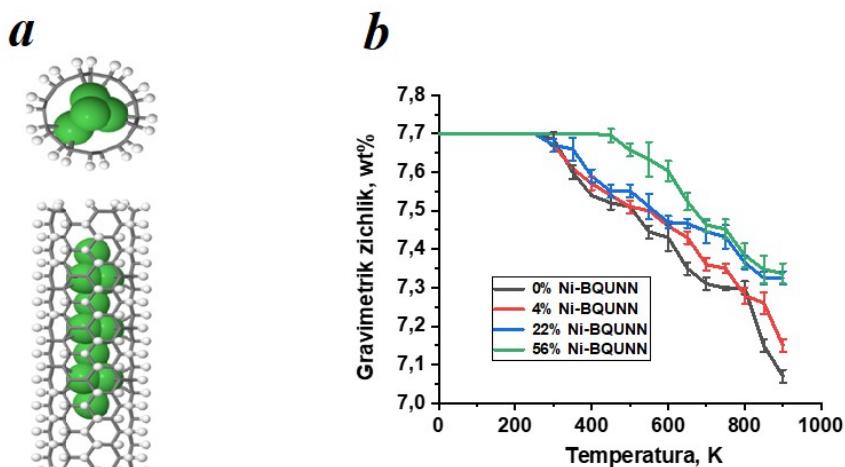


Рис. 1. а) Вид сверху и сбоку на ОУНТ, заполненную атомами никеля на 56%. б) Средняя гравиметрическая плотность адсорбированных атомов водорода в зависимости от температуры системы при различных объемных долях эндодральных атомов никеля.

В общем, в ходе исследования были проанализированы 4 типа ОУНТ: полые ОУНТ (0% Ni@ОУНТ) и ОУНТ с различным уровнем заполнения никелем (4% Ni@ОУНТ, 22% Ni@ОУНТ, 56% Ni@ОУНТ). Процесс десорбции водорода оценивался по гравиметрической плотности (wt.%) (рисунок 1а).

Из результатов можно видеть, что предельная температура для десорбции водорода превышает 250 К при объемной доле атомов Ni 0%, 4% и 22%. Однако при объемной доле Ni 56% начало десорбции наблюдается при температуре выше 400 К. При высоких температурах (900 К) эти значения соответственно уменьшаются до 7,08, 7,20, 7,43 и 7,47 мас.%. Увеличение объемной доли никеля приводит к повышению концентрации химически адсорбированных атомов/молекул водорода вокруг ОУНТ примерно в 1,06 раза (рисунок 1б). Данное исследование вносит вклад в понимание роли эндодральных атомов Ni на атомарном уровне в улучшении хранения водорода с использованием ОУНТ.

Список литературы

1. R. Krishna, E. Titus, M. Salimian, O. Okhay, S. Rajendran, A. Rajkumar, J. M. G. Sousa, A. L. C. Ferreira, João Campos Gil and Jose Gracio, "Hydrogen Storage for Energy Application", Hydrogen Storage Chapter 10, pp. 243-266. (2020).
2. Z.Y. Tian, Y.T. Liu, W.W. Wu, L.N. Jiangand, S.L. Dong, "Hydrogen storage of capped single-walled carbon nanotube via transition-metal doping" Europhysics Letters, Vol 104, № 3.
3. U. Khalilov et al., How the Alignment of Adsorbed Ortho H Pairs Determines the Onset of Selective Carbon Nanotube Etching, Nanoscale 2017. Vol. 9, №. 1653. pp. 1653-1661.

Б.Е. УМИРЗАКОВ, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, А.А. АБДУВАИТОВ, Ж.Б. ХУЖАНИЯЗОВ,
Б.В. ИБРАГИМОВА, А.У. ХУЖАНИЯЗОВА

Tашкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

СОЗДАНИЕ СКРЫТЫХ СЛОЕВ В CdTe В ПРОЦЕССЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТЖИГА

Впервые с использованием имплантации ионов Ba^+ средних энергий ($E_0 = 10 - 50$ кэВ) с последующим отжигом в приповерхностной области CdTe получены скрытые слои $\text{Cd}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Te}$.

B.E. UMIRZAKOV, D.A. TASHMUKHAMEDOVA, A.A. ABDUVAITOV, J.B. KHUJANIYOZOV,
B.V. IBRAGIMOVA, A.U. XUJANIYAZOVA

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

CREATION OF HIDDEN LAYERS IN CdTe BY ION IMPLANTATION AND SUBSEQUENT ANNEALING

For the first time, using the implantation of Ba^+ ions of medium energies ($E_0 = 10 - 50$ keV) followed by annealing in the near-surface region of CdTe, hidden layers of $\text{Cd}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Te}$ were obtained.

В последнее 15-20 лет активно изучаются полупроводниковые наноструктуры, созданные на основе бинарных полупроводников типа A^2B^6 обладающие специфическими эмиссионными, оптическими, магнитными и транспортными свойствами [1-4]. В случае CdTe достаточно хорошо изучены состав, электронная и кристаллическая структура трехкомпонентных фаз и пленок, созданных на поверхности методом низкоэнергетической ионной имплантации в сочетании с отжигом. Однако, такие исследования для трехкомпонентных соединений, созданных в приповерхностной области CdTe практически, не проводились.

В данной работе впервые методом ионной имплантации и последующим отжигом получены скрытые наноразмерные фазы и слои CdBaTe в CdTe и изучены их состав и физические свойства.

Перед исследованием пленка CdTe (111) обезгаживалась при $T=800$ К в течение 3-4 часов и кратковременно при $T=900$ К в сочетании с мягким травлением поверхности ионами Ar^+ с $E_0 = 2$ кэВ под углом 80° относительно поверхности при вакууме 10^{-7} Па. При этом поверхностная концентрация углерода уменьшалась до $\sim 0,5 - 1$ ат.%, кислорода – до 0,5 ат.%, а серы – до 0 ат.% (в пределах чувствительности оже-спектрометра).

В таблице 1 приведены значения h_m (глубина, которая соответствует максимуму распределения Ba), C_m (концентрация Ba в максимуме), Δd (толщина слоя $\text{Cd}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Te}$), полученные для CdTe, имплантированного ионами Ba^+ с энергиями 15 и 30 кэВ при $D = D_h$ до и после прогрева (в случае $E_0 = 30$ кэВ доза насыщения $\sim 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{опт}} = 1100$ К).

Таблица 1.

Значения h_m , C_m , Δd и x для CdTe, имплантированного ионами Ba^+ до и после прогрева при $T = 1100$ К.

Параметр	Прогрев	E_0 , кэВ	
		15	30
h_m , нм	до прогрева	~10	18
	после	~9	18
C_m , ат.%	до	~20	15
	после	27	21
Δd , нм	до	–	–
	после	6 – 7	9

Из таблицы 1 видно, что с ростом энергии ионов максимум распределения смещается в сторону больших энергий, полуширины кривой распределения увеличиваются, а концентрация бария в максимуме уменьшилась. Для $E_0=30$ кэВ значение h_m до и после прогрева не отличаются друг от друга и составляют 18 нм. До прогрева концентрация Ba в максимуме составляет ~ 15 ат.%, а после прогрева концентрация Ba увеличивается до 20 – 21 ат.% и образуется слой $\text{Cd}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Te}$ толщиной ~ 9 нм.

Список литературы

1. Palomera R.C., Martínez O.S., Pantoja-Enriquez J., Mathews N.R., Reyes-Banda M.G., Krishnan B., Mathew X. // Appl. Eng. 2017. Vol. 114. P. 1169–1175.
2. Агекян В.Ф., Holz P.O., Karczewski G., Кац В.Н., Москаленко Е.С., Серов А.Ю., Философов Н.Г. //ФТП. 2011. Том. 45. С.1353.
3. Abduvaiitov A.A., Boltayev Kh.Kh. // Technical Phys. 2015. V.60. №4. P.621.
4. Умирзаков Б.Е., Содикжанов Ж.Ш., Ташмухамедова Д.А., Абдуваитов А.А., Раббимов Э.А. // Письма в Журнал технической физики. 2021. Том 47. Вып. 12. С.3–5.

ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ТОНКОГО ПОКРЫТИЯ TiO₂/Si(111)

Методом рентгеновской дифракции изучены влияния прогрева на структуру и свойства пленок TiO₂ полученного на поверхности моноокристалла Si(111) магнетронным напылением. Установлено, что пленка TiO₂ состоит из отдельных кристаллических фаз (кристаллитов с размерами от 1,35 до 3,47 нм). После прогрева при T=900°C размеры этих фаз увеличивается до 10 раз. При этом степень кристалличности пленки составляет 18,9%.

B.E. UMIRZAKOV, Z.A. ISAXANOV, I.O. QOSIMOV, M.M. MAXMUDOV
Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE CRYSTALLINE STRUCTURE OF THE THIN TiO₂/Si(111) FILM

X-ray diffraction method was used to study the effects of heating on the structure and properties of TiO₂ films obtained on the surface of a Si(111) single crystal by magnetron sputtering. It was found that the TiO₂ film consists of individual crystalline phases (crystallites with sizes ranging from 1.35 to 3.47 nm). After heating at T = 900°C, the size of these phases increases by up to 10 times. At the same time, the degree of crystallinity of the film is 18.9%.

В настоящее время TiO₂ является одним из широко используемых материалов в промышленности и в производстве. Оксиды титана обладают высоким показателем преломления, стабильной морфологией поверхности и уникальными сенсорными, адсорбционными, оптическими и электрическими свойствами в центре внимания исследователей [1-3]. В данной работе приводятся результаты экспериментов по изучению влиянию температурного прогрева и γ облучении

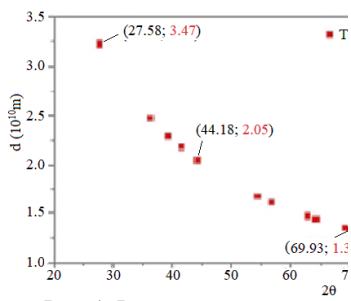


Рис. 1. Расстояние между атомами в образцаобразце TiO₂ до

на состав, электронную структуру и свойства нанопленок оксида титана TiO₂/Si(111) полученный методом магнетронного распыления пленки толщиной 1000 нм, при вакууме P=10⁻⁴ Па на поверхности Si(111). В работе в основном использовался метод порошковой рентгеноовской дифракции установкой типа XRD-6100. Было получено тонкая пленка TiO₂ толщиной 250-300 нм, для термообработки тонкого слоя TiO₂ из различных температурных воздействий была выбрана оптимальная температура как 900°C. После отжига при температуре ~900 С обнаружено, что интенсивность пиков тонкой пленки TiO₂ ($2\theta = 28,1209; 37,5534; 43,7689; 64,1480; 77,2465$) увеличивается за счет увеличения кристаллизации наночастиц TiO₂. Расчеты показали, что после отжига оксида титана аморфная фаза составляет 81,13%, а кристаллическая фаза всего 18,87%. Это указывает на то, что полученное нами тонкое покрытие в основном является аморфным. Результаты, полученные для образцов TiO₂

(исходный и отожженный) сравнивали с литературными данными, и было обнаружено, хорошая согласованность с полученными результатами. На рис. 1 и 2 показано изменения расстояние между атомами на многоатомных ячейках TiO₂, рассчитанное на основе данных, полученных методом порошковой дифрактометрии, в зависимости от температуры. На рис. 2 приведено определенное до нагрева для исходного образца расстояние между атомами в TiO₂: $d_{hkl}=3,23314 \text{ \AA}$ для угла $2\theta=25.59^\circ$; $d_{hkl}=2,04214 \text{ \AA}$ для угла $2\theta=44.321$; $d_{hkl}=1,3421 \text{ \AA}$ для угла $2\theta=70.0627^\circ$; Для кристаллической структуры TiO₂ (рис. 2), межатомное расстояние и средний размер кристаллита определяли, используя формулы Дебая-Шеррера: $D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$

Таким образом, методом рентгенофазового анализа, определены индексы Миллера и параметры решетки пленок оксида титана TiO₂. Установлено, что расстояние между атомами TiO₂ изменяется в зависимости от температуры, а размеры кристаллитов TiO₂ увеличивается на один порядок

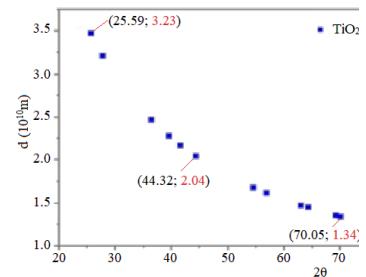


Рис. 2. Расстояние между атомами в TiO₂ после прогрева при температуре 900°C в течение 1 часа.

Список литературы

1. M. Koelsch, S. Cassaignon, J.F. Guillemoles, J.P. Jolivet, Comparison of optical and electrochemical properties of anatase and brookite TiO₂ synthesized by the sol-gel method Thin Solid Film 403–404 (2002) 312-319.
2. H. Tang, K. Prasad, R. Sanjines, P.E. Schmid, and F.L & y Electrical and optical properties of TiO₂ anatase thin films J. Appl. Phys. 75 (1994) 2042.

И.И. УСМАНОВ^{1,2}, С.Н. НИКОЛАЕВ¹, Е.А. ЕКИМОВ^{1,3}, М.В. ШЕСТАКОВ²,
Д.А. ЗАЗЫМКИНА¹, В.С. КРИВОБОК^{1,2}

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук, Троицк, Москва, Россия

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ Tm³⁺ В SnS₂, СИНТЕЗИРОВАННОМ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИИ И ТЕМПЕРАТУРЕ

Порошки SnS₂, допированного Tm³⁺, были синтезированы при высоких давлениях и температуре. Морфология порошков была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а химический состав методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Фазовый состав и оптические фононы были исследованы методами рентгенофазового анализа (РФА) и рамановской спектроскопии, соответственно. Фотолюминесцентная спектроскопия показала, что оптические переходы $^3F_{2,3} \rightarrow ^3H_6$ и $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ в ионах Tm³⁺ наблюдаются в диапазоне температур от 5 до 298 К.

I.I. USMANOV^{1,2}, S.N. NIKOLAEV¹, E.A. EKIMOV^{1,3}, M.V. SHESTAKOV²,
D.A.ZAZYMKINA¹, V.S. KRIVOBOK^{1,2}

¹Lebedev Physical Institute Russian Academy of Science, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³Vereshchagin Institute for High Pressure Physics Russian Academy of Science, Troitsk, Moscow, Russia

LUMINESCENCE OF Tm³⁺ IONS IN SnS₂ SYNTHESIZED UNDER HIGH PRESSURE AND HIGH TEMPERATURE

Tm³⁺-doped SnS₂ powders were synthesized under high pressure and high temperature. The morphology of powders was examined using Scanning Electron Microscopy (SEM), and the chemical composition was analyzed with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS). Phase composition and optical phonons were investigated using X-Ray Diffraction (XRD) and Raman Spectroscopy, respectively. Photoluminescence spectroscopy showed that the optical transitions $^3F_{2,3} \rightarrow ^3H_6$ and $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ of Tm³⁺ ions were observed in the range of temperature from 5 to 298 K.

Порошки SnS₂, допированные ионами Tm³⁺, были синтезированы при высоком давлении (8-9 ГПа) и температуре (~1600°C) с использованием камеры высокого давления «тороид-15» [1]. Исследование методом СЭМ показало, что порошок состоял из пластинок микрометрового размера. Рентгеновская ЭДС подтвердила, что полученные пластинки содержали химические элементы Sn, S и Tm. Методом РФА было установлено, что полученный порошок кристаллизовался в тригональной сингонии. Кроме того, было установлено, что в порошке находилась неизвестная примесная фаза. В рамановском спектре было обнаружено два пика, соответствующих модам A_{1g} и E_g фазы SnS₂, а также два неизвестных пика. Были исследованы спектры фотолюминесценции ионов Tm³⁺, соответствующие переходам $^3F_{2,3} \rightarrow ^3H_6$ и $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$, в диапазоне температур от 5 до 55 К (рис. 1). Указанные переходы в ионах Tm³⁺ могут быть использованы для измерения температуры.

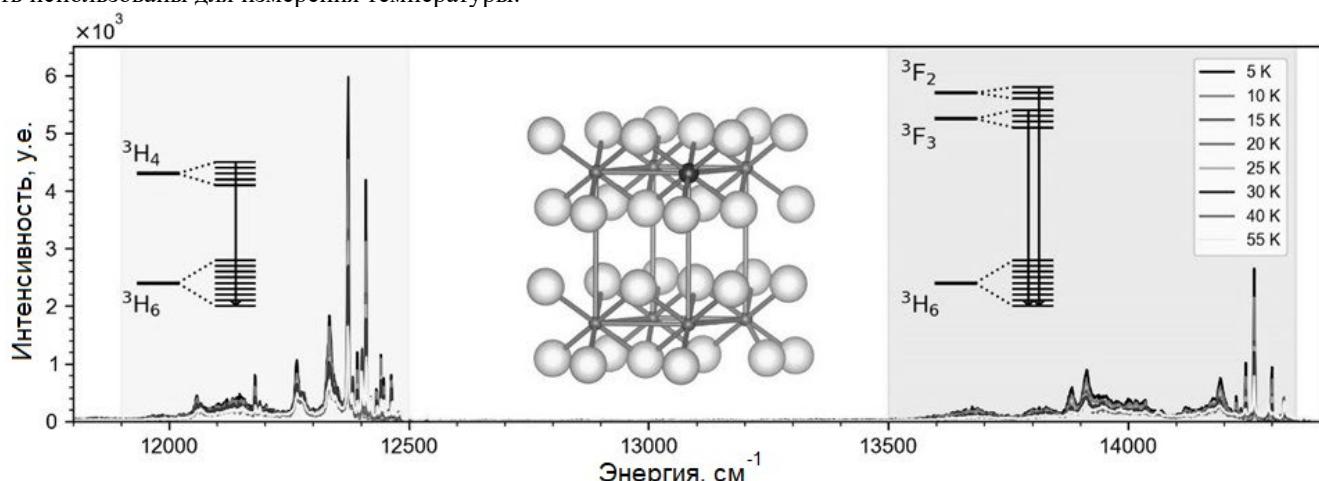


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции ионов Tm³⁺ в SnS₂ в диапазоне температур от 5 до 55 К. Возбуждение длиной волны 532 нм (2.331 эВ).

Список литературы

1. Krivobok V.S., Ekimov E.A., Kondrin M.V. and others // Phys. Rev. Mater. 2022. Vol. 6, № 9.P.094605.

И.Е. УТКИН, И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В работе рассматриваются актуальные вопросы исследования процессов радиационного воздействия на высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). Основное внимание уделено реализации методов молекулярно-динамического (МД) моделирования для численного описание дефектообразования в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO). Получены зависимости количества дефектов от энергии налетающего иона, числа дефектов от времени и сорта атомов решетки.

I. E. UTKIN, I. V. MARTIROSIAN, S.V. POKROVSKIY
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MODELING OF RADIATION EFFECTS ON $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ USING MOLECULAR DYNAMICS METHODS

The paper addresses current issues in the study of radiation effects on high-temperature superconductors (HTS). The main focus is on the implementation of molecular dynamics (MD) methods for the numerical description of defect formation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO). Dependencies of the number of defects on the energy of the incoming ion, the number of defects over time, and the types of atoms in the lattice have been obtained.

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) являются ключевыми материалами для создания магнитных систем различного назначения, включая ускорители частиц, токамаки и устройства космической техники. Среди них особое внимание уделяется соединению $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO), которое благодаря своим критическим характеристикам широко применяется в условиях высоких магнитных полей. Однако эксплуатация таких материалов неизбежно сопровождается воздействием радиации, что приводит к изменению их свойств. Для углубленного изучения этих процессов применяются численные методы моделирования, позволяющие анализировать поведение материала на атомном уровне.

В настоящей работе исследуются процессы радиационного воздействия на YBCO с использованием молекулярно-динамического (МД) моделирования. Основное внимание уделено влиянию энергии налетающих ионов, температуры и других параметров облучения на процессы дефектообразования. Подобные исследования направлены на повышение радиационной стойкости материала и минимизацию деградации его свойств. Проведённые расчёты продемонстрировали, что концентрация радиационных дефектов существенно зависит от параметров облучения. В частности, наиболее подвержены смещениям кислородные атомы, что связано с их низкой пороговой энергией. При низких температурах наблюдается более эффективная рекомбинация дефектов, тогда как повышение температуры приводит к увеличению их концентрации. Временная динамика каскадов атомных смещений также выявила пиковые значения через 1–2 пикосекунды после начала взаимодействия. Результаты включают в себя зависимости количества дефектов от энергии налетающего иона, числа дефектов от времени и сорта атомов решетки.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2024-0024) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ

Список литературы

1. D.X. Fischer, R. Prokopiec, J. Emhofer, M. Eisterer. Supercond. Sci. Technol. 31, 4, 044006 (2018)
2. Сундукова О.А., Белова И.М. Методика проведения компьютерного моделирования процесса ионной имплантации методом молекулярной динамики с помощью пакета программ для классической молекулярной динамики LAMMPS // Иннов: электронный научный журнал, 2017. №3 (32)
3. K.J. Leonard, F.A. List III, T. Aytug, A.A. Gapud, J.W. Geringer. Nucl. Mater. Energy, 9, 251 (2016).

А.В. ФРАНЦКЕВИЧ, В.А. МАРТИНОВИЧ, Н.В. ФРАНЦКЕВИЧ
 Белорусский Национальный Технический Университет, Минск, Республика Беларусь

МОДИФИКАЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО Cz-Si В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ В DC ПЛАЗМЕ ВОДОРОДА

Методом комбинационного рассеяния и сканирующей электронной микроскопии исследуется модификация поверхности пластин кремния в результате обработки в DC плазме водорода. Пластины монокристаллического Cz-Si обрабатывались в DC плазме водорода при разности потенциалов 1, 2.5 и 5 кэВ. Модификация поверхности может быть обусловлена не только внешним воздействием плазмы, но и водородом, внедренным в приповерхностный слой. Для разделения вклада этих двух компонент обработка проводилась при температурах 250 и 400°С. Проведенные исследования показали, что в зависимости от условий плазменной обработки можно получить как дефектную поверхность (растягивающие \ сжимающие напряжения) так и практически бездефектную поверхность.

A.V. FRANTSKEVICH, V.A. MARTINOVICH, N.V. FRANTSKEVICH
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

SINGLE CRYSTAL Cz-Si MODIFICATION DURING TREATMENT IN DC HYDROGEN PLASMA

The modification of the surfaces of silicon plates during treatment in a DC hydrogen plasma is studied by Raman scattering and scanning electron microscopy. Single crystal Cz-Si plates were treated in a DC hydrogen plasma with a potential difference of 1, 2.5 and 5 keV. Surface modification can be caused not only by plasma, but also by hydrogen itself embedded in the subsurface layer. To separate the contribution of these two reasons the treatment was carried out at temperatures of 150 and 250°C. It is shown that, depending on the plasma treatment conditions, it is possible to obtain both a defective surface (tensile/compressive stresses) and an almost defect-free surface.

В работах [1,2] рассматривается возможность формированияnanoструктур типа $\text{Si}\backslash\text{Si}_x\text{O}_y\backslash\text{Si}$ или $\text{Si}\backslash\text{Si}_x\text{N}_y\backslash\text{Si}$ в результате геттерирования кислорода или азота, вводимых в кремний из DC плазмы, на слое дефектов. Плазменная обработка проводилась при различных значениях разности потенциалов и плотности тока. Слой дефектов формировался предварительной имплантацией H^+ или He^+ флюенсом $D=(2-4)\times 10^{16}$ ат.\cm². Определенный интерес представляет возможность формирования дефектного слоя предварительной имплантацией гелия флюенсом $D=(5-10)\times 10^{15}$ ат.\cm² и в дальнейшем геттерирования на нем водорода, вводимого в кремний из DC плазмы. При определенных режимах плазменной обработки на поверхности, предварительно имплантированных пластин кремния, формировалась система вертикальных конусообразных структур [3], которые, в принципе, могут иметь самостоятельное практическое применение.

Главная цель данной работы экспериментально определить режимы плазменной обработки, при которых на поверхности пластин после плазменной обработки образуется минимальное количество дефектов. С этой целью в работе методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и комбинационного рассеяния (КР) исследуются пластины монокристаллического Cz-Si n-типа, обработанные в DC плазме водорода при разности потенциалов 1, 2.5 и 5 кэВ и температуре 250 и 400°С в течение 60 и 120 минут. Некоторые результаты СЭМ и КР представлены на рис. 1 (а, б, с).

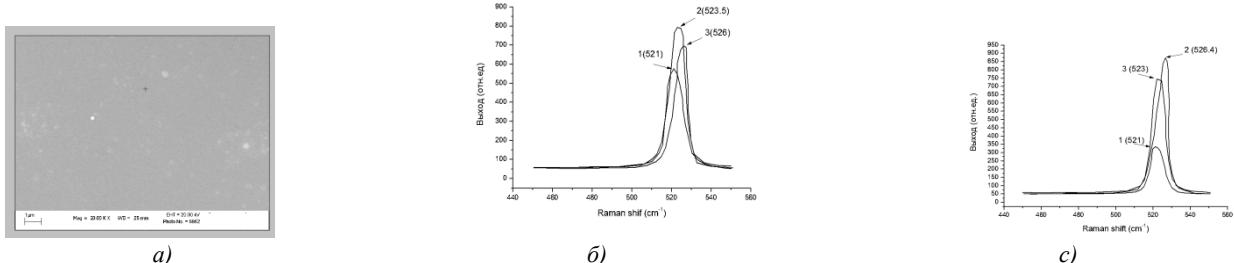


Рис. 1(а, б, с). Результаты СЭМ (а) и КР (б, с) полученные от образцов Si n-типа обработанных в DC плазме водорода при 250°С в течение $t=60$ мин (а, б). и 400°С в течение $t=120$ мин (с). Для спектров КР кривые 1, 2 и 3 относятся к режимам обработки при разности потенциалов 1, 2.5 и 5 кэВ соответственно

Список литературы

1. A.V. Frantskevich [et al] // Mat. Sci. and Eng. B. – 2005. – Vols. B 124-125. – P. 341.
2. A.V. Frantskevich et al. // Vacuum 83 (2009) P.103–106.
3. N. V. Frantskevich [et al.] // Acta Physica Polonica A. – 2014. – Vol. 125, № 6. – P. 1332-1334.

А.А. ХАЛЯВИНА, С.В. РОГОЖКИН, А.В. КЛАУЗ, А.А. БОГАЧЕВ
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ

В настоящей работе методом атомно-зондовой томографии [1] проведено исследование влияния термического старения на наноструктуру дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сталей Eurofer ODS, 10 Cr ODS и KP-3 ODS. Концентрация хрома в материалах варьируется от 9 до 14 ат.%, а также содержатся в различных соотношениях такие легирующие элементы как Al, V, Ti. Исследуемые образцы были состарены при температуре 650°C в течение 500 и 1000 часов.

A.A. KHALYAVINA, S.V. ROGOZHIN, A.V. KLAUZ, A.ABOGACHEV
NRC "Kurchatov Insititute", Moscow, Russia

ATOM PROBE TOMOGRAPHY STUDY OF THE EFFECT OF THERMAL AGING ON THE NANOSTRUCTURE OF OXIDE DISPERSION STRENGTHENED STEELS

In the present work, the nanostructure of oxide dispersion strengthened steels Eurofer ODS, 10Cr ODS and KP-3 ODS were studied using atom probe tomography [1] before and after thermal aging. The concentration of chromium in the materials varies from 9 to 14 at.%. Materials contain such alloying elements as Al, V, Ti in various ratios. The investigated samples were aged at 650°C for 500 and 1000 hours.

Дисперсно-упрочнённые оксидами (ДУО) стали, являются перспективными материалами для использования в активной зоне реакторов деления и синтеза нового поколения. К таким материалам предъявляется ряд требований, такие как высокая радиационная стойкость и стабильность механических свойств при температурах в пределах 700°C. Высокая жаропрочность в ДУО сталях обеспечивается за счет наличия тугоплавких оксидных частиц, равномерно распределённых в матрице [2–3]. Особый интерес представляет изучение изменений данных частиц, происходящих при длительных высокотемпературных воздействиях.

Исследования методом атомно-зондовой томографии показали значительные изменения в подсистеме кластеров после термического старения. После старения в течение 500 ч обнаружены: Cr-Y-O кластеры со средним размером (4 ± 1) нм и объёмной плотностью $(48 \pm 3) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ в Eurofer ODS, кластеры Cr-Y-O-Ti со средним размером (4 ± 1) нм и объёмной плотностью $(21 \pm 2) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ в стали 10Cr ODS, и кластеры Cr-Y-O-Ti размерами (4 ± 1) нм и объёмной плотностью $(60 \pm 3) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ в стали KP-3 ODS. После старения в течение 1000 ч тип кластеров не изменился, а их характеристики составили: средний размер (4 ± 1) нм и объёмная плотность $(37 \pm 5) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ в Eurofer ODS, размер (4 ± 1) нм и объёмная плотность $(15 \pm 2) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ в стали 10Cr ODS, и размер (3 ± 1) нм и объёмная плотность $(62 \pm 5) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ в стали KP-3 ODS.

Анализ полученных данных показывает: рост объёмной плотности кластеров (при сохранении или росте среднего размера) при старении в течение 500 ч; уменьшение объёмной плотности после старения в течение 1000 ч. Данные структурные изменения, предположительно, связаны с образованием новых кластеров и последующими процессами коалесценции.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП КАМИКС (<http://kamiks.itep.ru>) НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Michael K. Miller. Oak Ridge National Laboratory, P.O. Box 2008, Building 4500S, Mississippi 6136, Oak Ridge, Tennessee 37831-6136 "Atom probe tomography", Review of Scientific Instruments 78, 031101 (2007), Doi: 10.1063/1.2709758.
2. Xu S., Zhou Z., Jia H., Yao Z. // Steel research int. 2018. V. 90. P. 1800594. Doi:10.1002/srin.201800594.
3. Rogozhkin S.V., Klauz A.V., Bogachev A.A., Khomich A.A., Fedin P.A., Raznitsyn O.A. // Physics of Atomic Nuclei. 2022. V.85, No. 12.P. 1998. Doi: 10.1134/S1063778822120018

А.В. ЦУКАНОВ
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

УСЛОВНАЯ ДВУХКУБИТНАЯ ОПЕРАЦИЯ СНОТ НА ТРОЙНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ В ОПТИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ

Описывается алгоритм выполнения нетривиального вентиля «контролируемое-NЕ» на экситонном кубите с электрооптическим управлением. Предложена схема квантового чипа на полупроводниковых тройных квантовых точках с непрямыми экситонами, помещенных в оптический резонатор. Рассчитаны зависимости амплитуд импульсов отстроек частот квантовых точек и точности воспроизведения квантовой операции от времени. Показано, что операция CNOT может быть выполнена с высокой вероятностью >0.99.

A.V. TSUKANOV
NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

CONDITIONAL TWO-QUBIT OPERATION CNOT IN TRIPLE QUANTUM DOTS IN OPTICAL MICROCAVITY

An algorithm for performing a non-trivial "controlled-NOT" gate on an exciton qubit with electro-optical control is described. A scheme of a quantum chip based on semiconductor triple quantum dots with indirect excitons placed in an optical resonator is proposed. The dependences of the pulse amplitudes of the frequency detunings of quantum dots and the fidelity of the quantum operation on time are calculated. It is shown that the CNOT operation can be performed with a high probability >0.99.

Полупроводниковые низкоразмерные структуры на основе квантовых ям, квантовых точек (КТ) и имплантированных донорных атомов представляют большой интерес для квантовых информационных технологий [1]. Их совместимость сnanoфотонными системами (микрорезонаторами и волноводами) и контроль с помощью электрических и лазерных полей открывают широкие перспективы для создания гибридных масштабируемых квантовых устройств [2]. В работе рассматривается экситонный кубит на тройной квантовой точке (ТКТ), в которой кодировка и выполнение однокубитных операций производится по схеме зарядового кубита с электрическими затворами, а запускание с фотонной модой микрорезонатора (МР) осуществляется через обмен квантами телекоммуникационной частоты. Непрямой экситон, который состоит из локализованных в разных КТ электрона и дырки, обладает большим дипольным моментом и допускает эффективное управление внешними электрическими полями. Базисные состояния представлены непрямыми экситонами, электроны которых находятся в левой и правой КТ, а дырка – в центральной. Данная кодировка обеспечивает подавление релаксационных процессов и увеличение времени когерентности ТКТ-кубитов по сравнению с традиционным вариантом кубита на одной КТ с прямым экситоном.

Алгоритм, реализующий условный двухкубитный вентиль CNOT, разделяется на несколько этапов. Вначале состояние «единица» контролирующего кубита переводится во вспомогательное (оптически активное) состояние КТ С с помощью туннелирования между КТ. Затем данное состояние (прямой экситон) преобразуется в фотон моды МР путем ввода в резонанс их частот с помощью импульса напряжения соответствующей длительности и последующего вывода из резонанса. После этого центральная КТ С'контролируемого кубита вводится в резонанс с модой МР. Поглощение фотона МР приводит к генерации биэкситона в состоянии, образованного прямым и непрямым экситонами. После поглощения фотона необходимо вывести моду МР из резонанса КТ С'и ввести в резонанс двухэлектронные уровни всех трех КТ управляемого кубита для выполнения операции инверсии.

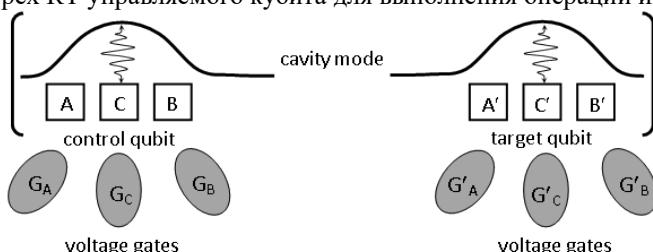


Рис. 1. Схема двух ТКТ-кубитов с управляемыми электрическими затворами, расположенных в пучностях моды оптического МР. Взаимодействие кубитов осуществляется путем их условного когерентного обмена фотоном через моду МР.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0016 «Фундаментальные и прикладные исследования в области разработки методов высокоточного моделирования и контроля элементной базы квантовых компьютеров».

Список литературы

1. Kim J.-H., Aghaeimeibodi S., Carolan J. and others // Optica. 2020. Vol. 7. P. 291.
2. Tsukanov A.V. // Optical and Quantum Electronics. 2024. Vol. 56. P. 1473.

А.В. ЦУКАНОВ, И.Ю. КАТЕЕВ
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

ДЕФАЗИРОВКА ЗАРЯДОВОГО КУБИТА, ВЫЗВАННАЯ СТРУКТУРНЫМИ ДЕФЕКТАМИ И СТОРОННИМИ ЗАРЯДАМИ

Рассматриваются полупроводниковые зарядовые кубиты на основе двойной квантовой точки, помещенные в оптический резонатор - дефект в фотонном кристалле, с учетом отклонений их параметров от заданных. Анализируются влияние топологического беспорядка в структуре фотонного кристалла на спектр резонатора и воздействие стохастического поля сторонних зарядов на состояние кубита. Указаны способы ослабления этих эффектов при управлении кубитом и пути оптимизации хранения его состояния.

A.V. TSUKANOV, I.YU. KATEEV
NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

CHARGE QUBIT DEPHASING CAUSED BY STRUCTURAL DEFECTS AND EXTERNAL CHARGES

Semiconductor charge qubits based on a double quantum dot placed in an optical resonator (a photonic crystal defect), are considered, taking into account deviations of their parameters from the specified ones. Influence of topological disorder of the photonic crystal structure on the resonator spectrum and effect of the stochastic field of external charges on the qubit state are analyzed. Methods for weakening these effects when controlling the qubit and ways to optimize the storage of its state are indicated.

Современная нанофотоника, успешно развивавшаяся в течение последних двадцати лет, обеспечила миниатюризацию и рост производительности многих высокотехнологичных устройств, используемых в квантовой оптике, сенсорике и информатике [1] на основе оптических микрорезонаторов (МР) и квантовых точек (КТ). Однако отклонения геометрических размеров и формы МР приводят к разбросу частот их собственных мод, искажению пространственной зависимости напряженности полей этих мод, а также к росту скорости диссипации. Не менее важным следует считать вопрос о шумах, создаваемых флуктуирующими и блуждающими зарядами, которые находятся в смачивающем слое в непосредственной близости от КТ [2]. Перемещаясь по кристаллу, эти заряды создают стохастическое поле, что приводит к дефазировке квантового состояния экситона (электрона) КТ.

В данной работе для анализа эффектов, связанных с несовершенством изготовления зарядового кубита на двойной КТ в МР, была рассмотрена модель чипа (рис. 1) с учетом флуктуаций геометрических размеров МР и стохастического движения свободных зарядов в объеме полупроводника, окружающего КТ. Было установлено, что точность воспроизведения для тождественной операции квадратично убывает со временем вследствие дефазировки квантового состояния кубита. Активным методом подавления дефазировки является наложение электрического поля, которое отводит электроны от кубита на границу раздела спейсера и полупроводника. Методом Монте-Карло было изучено влияние топологического беспорядка на спектральные характеристики МР на основе двумерного фотонного кристалла (ФК). Было показано, что случайное отклонение постоянной решетки и/или радиусов отверстий от заданных значений вызывает сдвиг длины волны собственной моды ФК и меняет амплитуду электрического поля в пучности его моды (рис. 1), что влияет на точность и скорость квантовых операций.

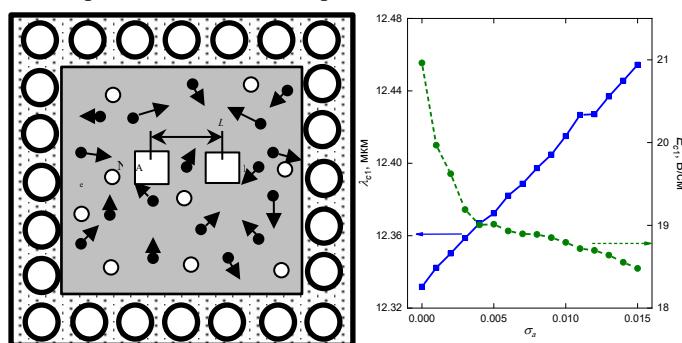


Рис. 1. Горизонтальный разрез чипа в области МРи зависимость собственной длины волны λ_{c1} моды и максимальной амплитуды однофотонного электрического поля E_{c1} от среднеквадратичного отклонения σ_a постоянной решетки a отверстий ФК.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0016 «Фундаментальные и прикладные исследования в области разработки методов высокоточного моделирования и контроля элементной базы квантовых компьютеров».

Список литературы

1. Dietrich C.P., Fiore A., Thompson M.G. and others // Las. Photon. Rev. 2016. Vol. 10. P. 870.
2. Borri P., Langbein W., Woggon U. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. P. 115328.

А.Д. ЧЕРТОВА, К. ГОНЧАРЕНКО, Е.В. ЧЕРНЫШОВА, А.Ю. ПОТАНИН, П.А. ЛОГИНОВ,
Е.А. ЛЕВАШОВ, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ
Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЁНКАХ Ti-B-C, Zr-B-C и Zr-Ti-B-C

Покрытия Ti-B-C, Zr-B-C и Zr-Ti-B-C были получены методом магнетронного напыления с использованием керамических мишней $TiB_2+40\%TiC$, $ZrB_2+40\%ZrC$ и $(Ti,Zr)B_2+40\%(Ti,Zr)C$. Изучены структура, механические и электрофизические свойства покрытий. Особое внимание уделено исследованию термической стабильности покрытий в процессе нагрева в режиме *in situ* в колонне просвечивающего электронного микроскопа. Результаты показали, что все покрытия характеризовались мелкодисперсной структурой с высокой долей аморфной составляющей. Согласно данным ПЭМ, наблюдалось отсутствие фазовых превращений в покрытиях до $600^\circ C$, что обуславливает стабильность механических и электрофизических свойств покрытий Ti-B-C, Zr-B-C и Zr-Ti-B-C.

A.D. CHERTOVA, K. GONCHARENKO, E.V. CHERNYSHOVA, A.YU. POTANIN, P.A. LOGINOV,
E.A. LEVASHOV, PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV
National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

THERMAL STABILITY AND STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS OF RESISTIVE Ti-B-C, Zr-B-C AND Zr-Ti-B-C FILMS

Ti-B-C, Zr-B-C and Zr-Ti-B-C coatings were obtained by magnetron sputtering using $TiB_2+40\%TiC$, $ZrB_2+40\%ZrC$ and $(Ti,Zr)B_2+40\%(Ti,Zr)C$ ceramic targets. The structure, mechanical and electrophysical properties of the coatings were studied. Particular attention was paid to the study of the thermal stability of the coatings during *in situ* heating in the column of a transmission electron microscope. The results showed that all the coatings were characterized by a finely dispersed structure with a high proportion of the amorphous component. According to the TEM data, there were no phase transformations in the coatings up to $600^\circ C$, which determines the stability of the mechanical and electrophysical properties of the Ti-B-C, Zr-B-C and Zr-Ti-B-C coatings.

Эвтектические и околоэвтектические боридно-карбидные системы перспективны для напыления резистивных пленок – за счет высокой термической стабильности структуры композиционные керамические пленки, как правило, обладают неизменным и относительно низким электросопротивлением в широком температурном диапазоне. Целью работы являлось исследование структуры, электрофизическими свойств и термической стабильности резистивных покрытий в системах Ti-B-C, Zr-B-C и Zr-Ti-B-C, полученных методом магнетронного распыления.

Покрытия были получены методом магнетронного напыления с использованием керамических мишней $TiB_2+40\%TiC$, $ZrB_2+40\%ZrC$ и $(Ti,Zr)B_2+40\%(Ti,Zr)C$. В качестве подложек использовались пластины из Al_2O_3 , Si/SiO_2 и $NaCl$. Подложки из Al_2O_3 перед нанесением покрытий подвергались ультразвуковой и ионной очистке. Покрытия осаждались при следующих условиях: остаточное и рабочее давление 10^{-3} и $0,1-0,2$ Па, соответственно, рабочий газ Ar . Мощность, подаваемая на магнетрон, составляла 1 кВт, время осаждения - 20 минут. Структура и состав покрытий были исследованы методами СЭМ, ПЭМ, РФА, ОЭСТР. Механические и электрофизические свойства определялись методами наноиндентирования и 4-х зондовым методом, соответственно.

In situ исследования термической стабильности и структурно-фазовых превращений покрытий Ti-B-C, Zr-B-C, Zr-Ti-B-C при нагреве проводились методом ПЭМ на микроскопе JEM-2100 JEOL. Тонкие фольги покрытий были получены посредством растворения подложки из $NaCl$ в дистиллированной воде. Фольги нагревались до $950^\circ C$ со скоростью $100^\circ C/\text{мин}$, шагом $200^\circ C$ в держателе Gatan 652. Тонкая структура исследовалась после изотермической выдержки в течение 15–30 мин. На следующей стадии были проведены вакуумные отжиги покрытий с последующим исследованием образцов методом РФА.

Результаты показали, что все покрытия в исходном состоянии обладают мелкодисперсной структурой с высокой долей аморфной фазы: на электронограммах наблюдалось широкое кольцо. Согласно микрофотографиям ПЭМ ВР покрытия Ti-B-C и Zr-B-C содержали единичные нанокристаллиты фаз $h-TiB_2$ и $h-ZrB_2$ с межплоскостными расстояниями $d/n = 0,263$ и $0,353$ нм, соответственно. Покрытие Zr-Ti-B-C содержало единичные кристаллиты фаз $h-(Ti,Zr)B_2$ и $r-B_4C$ размером 5–15 нм. Покрытия обладали низким температурным коэффициентом сопротивления порядка $1 \times 10^{-5} 1/K$ и удельным электрическим сопротивлением в диапазоне 200–450 $\mu\Omega \cdot cm$. Результаты *in situ* нагрева в ПЭМ и вакуумных отжигов показали, что все покрытия характеризовались стабильностью структуры до $600^\circ C$. Высокая термическая стабильность покрытий обеспечивает постоянство удельного электрического сопротивления в диапазоне температур от 20 до $600^\circ C$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-13-00085).

М.С. ШЕСТОПАЛОВА^{1,2}, А.К. САРЫЧЕВ³, А.В. ИВАНОВ³, И.В. БЫКОВ³, В.А. ОЛЕЙНИКОВ^{1,2},
К.Е. МОЧАЛОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, Москва, Россия

³Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА УСИЛЕНИЕ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОСФЕР В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Исследовано усиление спектров комбинационного рассеяния (КР) единичных диэлектрических (полистирольных) микросфер в тонкой (10 нм) металлической оболочке, осаждённых на покрытые серебром покровные стёкла. Обнаружено, что при увеличении интенсивности лазера возникает явление термической активации, приводящее к значительному возрастанию интенсивности сигнала КР, а также к появлению новых пиков на спектрах.

M.S. SHESTOPALOVA^{1,2}, A.K. SARYCHEV³, A.V. IVANOV³, I.V. BYKOV³, V.A. OLEINIKOV^{1,2},
K.E. MOCHALOV²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, RAS, Moscow, Russia

³Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics, RAS, Moscow, Russia

INFLUENCE OF THERMOACTIVATION ON THE ENHANCEMENT OF RAMAN SCATTERING SPECTRA OF DIELECTRIC MICROSPHERES IN METAL SHELL

The enhancement of Raman scattering (RS) spectra of individual dielectric (polystyrene) microspheres in a thin (10 nm) metal shell and deposited on silver-coated cover glasses was investigated. It was found that increasing the laser intensity induces a thermal activation phenomenon, leading to a significant increase in the RS signal intensity and the appearance of new peaks at the spectra.

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) позволяет детектировать вещества в ультразонизких концентрациях, что делает этот метод востребованным в самых различных областях, в особенности, в диагностике онкологических заболеваний. На сегодняшний день одним из актуальных направлений в области ГКР является исследование причин усиления сигнала КР. В предыдущей статье [1] была представлена аналитическая теория усиления КР диэлектрическими микросферами в тонкой серебряной оболочке.

В данной работе были исследованы полистирольные микросфера диаметром 300 нм, осажденные на предварительно подготовленные стекла, покрытые 200 нм слоем серебра. Толщина верхнего серебряного покрытия микросфер составляет 10 нм. Спектры ГКР были получены от единичных микросфер на длине волны 532 нм. Для изучения влияния нагрева на ГКР-спектры микросфер в каждой точке были сняты несколько спектров при разных значениях мощности возбуждающего излучения. Первый спектр был снят на мощности 0.005 мВт (Рис.1а). Следующий – на мощности в 5 раз большей (рис.1б). В течение времени регистрации (25 с) второго спектра происходил нагрев микросферы. Обнаружено, что в некоторых случаях в процессе нагрева микросфера «сгорает» – на полученном спектре появляются пики аморфного углерода, а в других – возникает явление термической активации. Данное обстоятельство свидетельствует о существовании некоторого термического диапазона, в котором может произойти одно из этих двух явлений. Также, было замечено, что интенсивность спектра, полученного в момент термоактивации, возросла как минимум в 10 раз, что означает её нелинейную зависимость от мощности. Кроме того, интенсивность спектров, снятых после термической активации от той же микросферы (рис.1в), значительно возросла по сравнению с самым первым спектром, а на самих спектрах возникли новые пики.

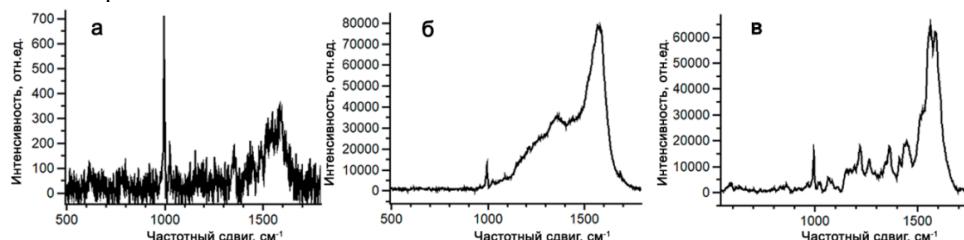


Рис. 1. Спектры ГКР полистирольных микросфер, покрытых 10 нм слоем серебра: а) до термоактивации; б) в момент термоактивации; в) после термоактивации.

Таким образом, в ходе данной работы было обнаружено явление термической активации, приводящее к значительному нелинейному возрастанию интенсивности спектров, а также к видоизменениям ГКР-спектров.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00788).

Список литературы

1. Sarychev A.K., Ivanov A.V., Bykov I.V. et al.// Bull. Lebedev Phys. Inst. 2023. Vol. 50, Suppl13. P. S1492-S1503.

**Секция
УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И
РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., проф. Полозов Сергей
Маркович
– к.т.н., доцент Гусарова Мария
Александровна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8226

E-mail: SMPolozov@mephi.ru, MAGusarov@mephi.ru

М.В. ЛАЛАЯН, А.Г. ПОНОМАРЕНКО
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

**К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
ПРОФЕССОРА, ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК ОЛЕГА СЕРГЕЕВИЧ МИЛОВАНОВА**

10 февраля 2025 года мы отмечаем день памяти Олега Сергеевича Милованова. В этот день 100 лет назад родился известный советский и российский физик, специалист в области экспериментальной физики ускорителей заряженных частиц. Доктор технических наук Олег Сергеевич Милованов много лет проработал в Московском инженерном институте на кафедре Электрофизических установок штатным профессором, специализируясь на разработке радиочастотных и микроволновых систем.

M.V. LALAYAN, A.G. PONOMARENKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

**THE 100TH ANNIVERSARY OF DOCTOR OF SCIENCE,
PROFESSOR OLEG SERGEEVICH MILOVANOV**

February 10th, 2025 is the centennial day of Oleg Sergeevich Milovanov. Well-known Soviet and Russian physicist mastered in experimental charged particle accelerator science was born this day 100 years ago. Doctor of technical sciences Oleg Milovanov for many years worked for Moscow Engineering Institute at Department of Electrophysical facilities as full-time staff Professor specialized in radio frequency and microwave systems development.

Олег Сергеевич Милованов – советский и российский физик-экспериментатор, специалист в области высокочастотных систем более 40 лет работал на кафедре Электрофизических установок НИЯУ МИФИ. Научная работа Олега Сергеевича была связана с разработкой опытно-серийных линейных ускорителей электронов и ионов, исследованием и проектированием высокочастотных систем для ЛУ различных типов. В этой области он являлся одним из крупнейших специалистов Советского Союза. При его непосредственном участии в ряде организаций страны было создано несколько радиационных лабораторий. За разработку ускорителей для народного хозяйства он был награжден двумя медалями ВДНХ.



Милованов Олег Сергеевич
(1925 – 2004)

Олег Сергеевич вел большую преподавательскую и научно-исследовательскую работу на кафедре Электрофизических установок, руководил учебно-исследовательской работой студентов, курсовым и дипломным проектированием. За время работы преподавателем им были подготовлены и изданы учебные пособия по курсам "Техника СВЧ", "Радиотехника", "Мощная импульсная техника", которые не теряют актуальности и сегодня.

Активная научная и педагогическая деятельность Олега Сергеевича сочеталась с большой общественной работой. Он являлся заместителем заведующего кафедрой по учебной работе, членом методического Совета факультета, членом Специализированного Совета МИСИ, председателем учебно-воспитательной комиссии кафедры. Олег Сергеевич пользовался заслуженным уважением и авторитетом среди преподавателей, сотрудников и студентов института.

Список литературы

1. Открытая Золотая книга памяти МИФИ, https://fliphml5.com/syzy/pikm/Открытая_Золотая_книга_памяти/
2. В.Г. Терентьев и др., Справочник «Кто есть кто в атомной энергетике и промышленности России», Обниск, Издательство «Титул», 1995

Ю. СЕНИЧЕВ^{1,2}, А. АКСЕНТЬЕВ^{1,3}, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ¹, В. ЛАДЫГИН⁵, А. МЕЛЬНИКОВ^{1,4},
Н. НИКОЛАЕВ^{2,4}, Е. СЫРЕСИН⁵, Ю. ФИЛАТОВ²

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

⁴Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

⁵Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НУКЛОНРА ДЛЯ ПОИСКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ДЕЙТРОНА И ПРОТОНА С СОХРАНЕНИЕМ ВСЕХ ФУНКЦИЙ БУСТЕРНОГО КОЛЬЦА NICA

Целью исследований являлось определение взаимосвязи между Нуклонроном и коллайдером НИКИ, включающей в себя модификацию магнитооптической структуры Нуклонрона для создания синхротрона с двумя функциями в одном ускорителе: бустера для инжекции в коллайдер и независимого кольца синхротрона-накопителя для проведения прецизионных экспериментов по исследованию ЭДМ легких ядер и поиску аксиона. При этом должны выполняться следующие условия:

- модернизированное кольцо должно располагаться в существующем туннеле действующего на сегодня ускорителя Нуклонрона;
- максимальное поле в магнитах не превышает 1.8 Тесла;
- дисперсионная функция на прямых промежутках максимально приближена к нулевому значению;
- реализация режима «квази-замороженного» спина в Нуклонроне с целью создания условий для исследования ЭДМ дейтрана;
- определение предельных параметров пучка протонов для исследования ЭДМ в предполагаемом кольце Нуклонрона;
- исследование возможных вариантов исключения прохождения поляризованного пучка протонов через критическую энергию в коллайдере после электронного охлаждения с целью сохранения высокой светимости;
- магнитооптическая структура с точки зрения сохранения и управления спином должна быть одобрена Ю. Филатовым.

YU. SENICHEV^{1,2}, A. AKSENTYEV^{1,3}, S. KOLOKOLCHIKOV¹, V. LADYGIN⁵, A. MELNIKOV^{1,4}, N.
NIKOLAEV^{2,4}, E. SYRESIN⁵, YU. FILATOV²

¹Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

⁴L.D. Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia

⁵Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

MODERNIZATION OF THE NUCLotron LATTICE TO SEARCH FOR THE DEUTERON AND PROTON ELECTRIC DIPOLE MOMENT PRESERVING ALL NICA BOOSTER RING FUNCTIONS

The aim of the study was to determine the relationship between the Nuclotron and the NICA collider, including modification of the Nuclotron magneto-optical structure to create a synchrotron with two functions in one accelerator: a booster for injection into the collider and an independent synchrotron-storage ring for conducting precision experiments on the EDM of light nuclei and the search for an axion.

The following conditions must be met:

- the modernized ring must be located in the existing tunnel of the currently operating Nuclotron accelerator;
- the maximum field in the magnets does not exceed 1.8 Tesla;
- the dispersion function on straight sections is as close as possible to zero;
- implementation of the "quasi-frozen" spin mode in the Nuclotron in order to create conditions for searching for the deuteron EDM;
- determination of the limiting parameters of the proton beam for searching the EDM in the proposed Nuclotron ring;
- study of possible options for eliminating the passage of a polarized proton beam through the critical energy in the collider after electron cooling in order to maintain high luminosity;
- magneto-optical structure from the point of view of spin conservation and control should be approved by Yu. Filatov.

А.П. ДУРКИН, В.В. ПАРАМОНОВ

Федеральное Государственное Учреждение Науки Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩЕГО КАНАЛА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ НА НИЗКИЕ ЭНЕРГИИ

Предложена простая методика анализа характеристик Ускоряюще-Фокусирующего Канала (УФК), состоящего из коротких резонаторов и расположенных между ними фокусирующих элементов, позволяющая не прибегая к моделированию динамики частиц, определить границы ограничений основных взаимосвязанных параметров УФК – энергии частиц, количества ячеек в резонаторах, темпа ускорения, градиента фокусирующего поля и аксептанса. Дан пример применения методики для структуры, работающей на частоте 476 МГц при схеме фокусировки ФДО.

A.P.DURKIN, V.V.PARAMONOV

Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, Russia

A METHOD FOR PRELIMINARY PARAMETERS ANALYSIS OF THE ACCELERATING-FOCUSING CHANNEL IN A LOW-ENERGY IONS LINEAR ACCELERATOR

A simple method for analyzing the characteristics of the Accelerating-Focusing Channel (AFC) consisting of short cavities and focusing elements located between them is proposed. It allows, without resorting to modeling the dynamics of particles, to determine the limits of the main interrelated AFC parameters - the particles energy, the number of cells in the cavities, the acceleration rate, the focusing field gradient, and the AFC acceptance. An example of the application of the method for accelerator with frequency 476 MHz and FDO focusing schemes is given.

Применение в начальной части Линейного Ускорителя Ионов (ЛУИ), после предускорителя RFQ, коротких резонаторов с расположенными между ними фокусирующими элементами дает технико-экономические преимущества при сооружении, наладке и эксплуатации ЛИУ. Но в разработке УФК ЛУИ возрастают проблемы динамики пучка. Сокращается область устойчивости продольного движения. Увеличение длины периода фокусировки L_f по сравнению со структурой Альвареца, ведет к увеличению параметра A дефокусировки пучка ускоряющим полем.

Возникает задача обоснованного выбора взаимосвязанного набора параметров УФК – энергии частиц W , темпа ускорения $E = E_0 T \cos(\phi_s)$, количества ячеек в резонаторе k , градиента фокусирующего поля G . Предлагаемый метод предварительного анализа состоит в следующем. Рабочая длина волны λ резонаторов определяется общими характеристиками ЛУИ. Задаем минимально допустимое расстояние между резонаторами d , определяемое конструктивными требованиями. Выбираем схему фокусировки (ФОДО или ФДО) и находим зависимость $A_{max}(\alpha)$, где α – коэффициент заполнения периода фокусировки резонаторами. Если длина резонатора $L_c = k\beta\lambda$, то $L_f = k\beta\lambda/\alpha$ для схемы ФДО и $L_f = 2k\beta\lambda/\alpha$ для схемы ФОДО. Параметр дефокусировки при этом пропорционален $(k/\alpha)^2$.

Максимально допустимое значение A_{max} определяем исходя из условия, что градиенты фокусирующего поля, определяющие верхнюю и нижнюю границы области устойчивости при $A = A_{max}$, отличаются в 1.5 раза. Получаем два уравнения

$$(k/\alpha)^2 (\pi q E \lambda \operatorname{tg}(\phi_s) / (W_0 \beta \gamma^3)) = A_{max}(\alpha),$$

$$\alpha = k\beta\lambda / (k\beta\lambda + d).$$

Решая эти уравнения для любой пары значений W и $E \operatorname{tg}(\phi_s)$ относительно k и α , получаем оценку для допустимого количества ячеек k . Попутно, полагая набег фазы μ на периоде 60° ($\cos\mu=0.5$) находим величину фактора фокусировки $Q(\alpha)$ и параметр $v(\alpha)$, связанный с аксептансом УФК соотношением $E_{max} = vR^2\beta\gamma/L_f$, что позволяет оценить интегральное фокусирующее поле (Gd для ФОДО и $Gd/2$ для ФДО), и величину E_{max}/R^2 , полезную для оценки аксептанса УФК. Ниже приводятся таблицы 1,2 параметров УФК при возможных значениях энергии W и темпа ускорения E для структуры с частотой 476 МГц, $\phi_s=30^\circ$, $d=8$ см и фокусирующим периодом ФДО.

Таблица 1 $L_f/\beta\lambda(E, W)$

$E, \text{МВ}$ \\ $W, \text{МэВ}$	5	6	7	8	9	10
1.5	4.04	3.60	3.28	3.03	2.83	2.64
2	4.48	4.05	3.71	3.42	3.18	2.97
3	5.22	4.71	4.31	3.98	3.70	3.49
5	6.19	5.59	5.11	4.75	4.47	4.22

Таблица 2 $Gd/2 (E, W)$

$E, \text{МВ}$ \\ $W, \text{МэВ}$	5	6	7	8	9	10
1.5	4.82	5.01	5.16	5.39	5.59	5.75
2	4.83	5.17	5.43	5.62	5.76	5.84
3	5.28	5.60	5.79	5.87	5.87	6.11
5	6.32	6.31	6.03	6.04	6.36	6.64

Приведенные в таблицах данные соответствуют существующим представлениям о взаимосвязи параметров УФК, что подтверждает правильность предлагаемой методики.

А.Е. АКСЕНТЬЕВ^{1,2}, А.А. МЕЛЬНИКОВ^{1,3}, С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ¹, Ю.В. СЕНИЧЕВ¹

¹Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МЕТОДА ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЕМ К СТРУКТУРЕ С КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННЫМ СПИНОМ

В работе представлен текущий статус разработки метода частотной области для измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) частицы в накопительном кольце. Выделены две задающих области исследований. Представлен набросок плана разработки модели исследования. Представлены первые результаты исследования принципиальной возможности наблюдения ЭДМ в кольце с квази-замороженным спином.

A.E. AKSENTYEV^{1,2}, A.A. MELNIKOV^{1,3}, S.D. KOLOKOLCHIKOV¹, YU.V. SENICHEV¹

¹Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³Institute for Theoretical Physics. L.D. Landau, Chernogolovka, Russia

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE FREQUENCY DOMAIN METHOD IN APPLICATION TO THE QUASI-FROZEN SPIN LATTICE

The work presents the current status of the development of a model of the frequency domain method to detect the particle electric dipole moment (EDM) in a storage ring. Two leading research subjects are being articulated. The research project is being sketched out. First results of the research into the viability of observing the EDM in a quasi-frozen spin ring are being presented.

Метод частотной области [1] измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) частицы возник как ответ на технические трудности реализации идеи классического метода замороженного спина, предложенного коллаборацией брукхейвенской национальной лабораторией (БНЛ). Он состоит в сравнении частот спин-прецессии пучка, встречающегося с прямым и зеркальным отражениями спин-динамической ситуации, реализованной накопительным кольцом. Поскольку электрический дипольный момент нарушает хиральность, зеркальное отражение спин-динамической ситуации подвергается искажению, в том случае, если ЭДМ действительно присутствует в системе.

Условия действительности присутствия ЭДМ в накопительном кольце ходят под общей рубрикой “замороженного спина.” Их также можно было бы озаглавить как условия “МДМ-прозрачности.” Речь идет о нейтрализации эффекта воздействия магнитного дипольного момента (МДМ) на пучок, что позволяет гипотетически гораздо меньшему ЭДМ проявиться. Классическое условие МДМ-прозрачности предполагает локальную нейтрализацию воздействия МДМ; кольцо с “замороженным спином” означает локально МДМ-прозрачное кольцо.

Однако, условия локальной МДМ-прозрачности не могут быть выполнены на любом кольце. К тому же, локальная прозрачность, предположительно, не требуется, поскольку наблюдение за поляризацией пучка, говорящей о возможном присутствии ЭДМ, производится в единственной точке кольца. Сама оригинальная идея БНЛ предполагала накопление действия ЭДМ. Это послужило стимулом к развитию идеи структуры с “квази-замороженным спином.” [2]

В свою очередь, отступление от условия локальной прозрачности, которое автоматически гарантировало МДМ-прозрачность кольца как целого, поставило ряд вопросов. В первую очередь, вопрос о том, не нарушает ли оно процесс накопления, эффективно стирая локальные ЭДМ-действия на уровне целого кольца. Принципиальный ответ на этот вопрос дают результаты моделирования спин-динамики, представленные в докладе. Этот ответ положительный: накопление ЭДМ, если он и правда присутствует, в квази-замороженной структуре ничем не отличается от того же в локально-прозрачной. Помимо этого, мы пытаемся артикулировать основные моменты метода частотной области, и соответствующие им исследования, требующие проведения.

Список литературы

1. Senichev Y. and others // arxiv.org/abs/1711.06512 (2017).
2. Senichev Y. and others // in Proc. IPAC 15, Richmond, VA, USA pp. 213–215 (2015).

А.А. МЕЛЬНИКОВ^{1,2}, Ю.В. СЕНИЧЕВ¹, А.Е. АКСЕНТЬЕВ^{1,3}, С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ¹

¹Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТИПА КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО СПИНА ДЛЯ ПОИСКА ЭДМ

Рассмотрена структура накопительного кольца типа квази-замороженного спина, состоящая из магнитных элементов и фильтров Вина. При этом учтено вращение спина под действием Электрического Дипольного Момента (ЭДМ) и Магнитного Дипольного Момента (МДМ) с компенсацией МДМ-вращения. Получены основные характеристики структуры, такие как направление инвариантной оси и частота спин-прецессии. Рассмотрены спиновые характеристики идеальной структуры и структуры с ошибками выставки элементов, такими как поворот магнитов вокруг продольной оси.

A.A. MELNIKOV^{1,2}, YU.V. SENICHEV¹, A.E. AKSENTYEV^{1,3}, S.D. KOLOKOLCHIKOV¹

¹Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,

²Institute for Theoretical Physics. L.D. Landau, Chernogolovka, Russia,

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE QUASI-FROZEN SPIN LATTICE FOR THE EDM SEARCH

The storage ring lattice of the quasi-frozen spin type consisting of magnetic elements and Wien filters is considered. In this case, the spin rotation under the action of the Electric Dipole Moment (EDM) and the Magnetic Dipole Moment (MDM) with compensation for the MDM rotation is taken into account. The main characteristics of the structure such as the direction of the invariant spin axis and the spin precession frequency are derived. The spin characteristics of the ideal structure and the structure with misalignments of elements such as the rotation of magnets around the longitudinal axis are considered.

Одним из перспективных методов измерения ЭДМ является метод замороженного спина [1]. При этом вектор спина частиц движется сонаправлено с вектором импульса. Структуры типа замороженного спина представляют собой накопительные кольца, специально спроектированные для решения экспериментальной задачи по поиску ЭДМ. В синхротронах, изначально не предназначенных для поиска ЭДМ, можно реализовать режим квази-замороженного спина [2]. При этом размещаются фильтры Вина на прямых участках, компенсирующие действие поворотных магнитов на спин. Основным методом измерения ЭДМ, позволяющим достичь точности в 10^{-29} е·см, является метод частотной области. При этом измеряется частота спин-прецессии или спин-тыон в точке поляриметра в структуре с возмущениями полей в элементах [3]. Следовательно, для прецизионного измерения ЭДМ необходимо получить аналитическое выражение для измеряемой частоты и направления оси спин-прецессии.

Можно показать, что в структуре типа квази-замороженного спина, состоящей из поворотных магнитов и фильтра Вина, при компенсации МДМ-вращения спин-тыон представляется в виде $v_s = \sin(\varphi_m/2) \cdot \xi/\pi$. Здесь φ_m есть угол поворота спина в магнитном сегменте кольца, а ξ есть угол наклона $\vec{\Omega}$ относительно вертикали, пропорциональный ЭДМ, или $\xi = \Omega_{EDM}/\Omega_{MDM}$. Причём вращение спина происходит вокруг вектора $\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}$. При компенсации МДМ-вращения спина в фильтре Вина инвариантная ось лежит в плоскости кольца с компонентами: $n_r = \cos(\varphi_m/2)$, $n_z = -\sin(\varphi_m/2)$. Также можно показать, что ослабление измеряемого ЭДМ-сигнала в структуре типа квази-замороженного спина по сравнению с структурой замороженного спина есть $r = \sin(\varphi_m/2)/(\varphi_m/2)$. Отсюда следует, что для прецизионного измерения ЭДМ необходимо уменьшать φ_m . Для частиц с относительно большим значением магнитной аномалии G , например протонов, необходимо размещение нескольких пар магнитных сегментов с фильтрами Вина.

Для магнитного сегмента кольца с несовершенствами, на примере наклонов поворотных магнитов вокруг продольной оси, получено выражение для оси спин-прецессии: $\vec{c} = c_y \vec{e}_y + [c_x + \xi] \vec{e}_x + c_z \vec{e}_z$. Тогда для магнитного кольца с несовершенствами и фильтра Вина, компенсирующего МДМ-вращение, измеряемая частота спин-прецессии или спин-тыон есть: $v_s = \sin(\varphi_m/2) \cdot 1/\pi \cdot \sqrt{(c_x + \xi)^2 + c_z^2}$. Линейный закон сложения частот спин-прецессии, вызванных МДМ и ЭДМ при $c_x \gg c_z$, позволяет измерять ЭДМ-сигнал частотным методом [3].

Список литературы

1. Abusaif F. and others // Tech. Rep. CERN-2021-003 vol 3 (2021).
2. Senichev Y. and others // in Proc. IPAC 22, Bangkok, Thailand pp. 492–495 (2022).
3. Senichev Y. and others // arxiv.org/abs/1711.06512 (2017).

М.В. ВЛАДИМИРОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» – Москва, Россия

В ПОИСКАХ САМОСОГЛАСОВАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОКАТОДОВ В ФОТОПУШКАХ

В работе описывается состояние дел в части построения самосогласованной модели для описания фотоэмиссии из полупроводниковых фотокатодов. Демонстрируются достигнутые к настоящему времени результаты, сильные и слабые стороны модели.

M.V. VLADIMIROV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

SEARCHING FOR A SELF-CONSISTENT APPROACH TO DESCRIBE SEMICONDUCTOR PHOTOCATHODE OPERATING IN PHOTOGUNS

In this research, the status of the model to describe photoemission from semiconductor photocathodes is presented. We demonstrate current progress, advantages and disadvantages for the model under development.

Генерация ярких электронных сгустков для фундаментальных приложений рутинно происходит с использованием фотопушек. В высокочастотных (ВЧ) фотопушках электроны эмиттируются с поверхности фотокатода под действием коротких лазерных импульсов, сфазированных с внешним ускоряющим ВЧ полем резонатора. Параметры электронного сгустка (такие как профиль пучка, его геометрические размеры, эмиттанс, заряд) во многом определяются на этапе его формирования, т.е. фотоэмиссией.

Фотоэмиссия, согласно общепринятой модели Спайсера, происходит в три этапа. На первом электроны поглощают энергию фотона лазерного импульса (возбуждаются). Затем, на втором этапе, происходит направленное или хаотическое (в присутствии или отсутствии «тянущего» электрического поля) движение фотоэлектронов к поверхности фотокатода. Наконец, на третьем этапе фотоэлектроны преодолевают потенциальный барьер и эмиттируются в вакуум.

Транспорт возбужденных электронов в фотокатоде, являясь наиболее продолжительным из трех представленных процессов, играет существенную роль с точки зрения влияния на временные характеристики фотоэмиссии и, как следствие, фототока. Прежний подход, использующий уравнение непрерывности (см., например, [1-4]), оказался весьма продуктивным, позволив, в частности, получать оценку времени отклика фотокатода – временного параметра, связанного с затягиванием фронтов профиля фототока из-за конечного времени выхода фотоэлектронов в вакуум.

Данный доклад является очередным шагом на пути к самосогласованному подходу для описания эмиссии из полупроводниковых фотокатодов в фотопушках. Формулируются и численно решаются связанные одномерные задачи дрейфа-диффузии для избыточных электронов проводимости и дырок, образованных в результате фотоэффекта. Эволюция носителей заряда в данном рассмотрении, с одной стороны, определяется напряженностью электрического поля в фотокатоде. С другой стороны, поле в фотокатоде зависит от распределения носителей заряда в полупроводнике, что делает задачи для электронов и дырок самосогласованными.

Список литературы

1. P. Hartmann, J. Bermuth, D. v. Harrach et al., A diffusion model for picosecond electron bunches from negative electron affinity GaAs photocathodes, *J. Appl. Phys.* 86 (1999) 2245–2249.
2. I.V. Bazarov, B.M. Dunham, Yu. Li et al., Thermal emittance and response time measurements of negative electron affinity photocathodes, *J. Appl. Phys.* 103 (2008) 054901.
3. H. Jani, L. Chen and L. Duan, Pre-Emission Study of Photoelectron Dynamics in a GaAs/AlGaAs Photocathode, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 56 (2020) 1–8.
4. T. Jia, L. Gan, H. Guo et al., Response time characteristics of a transmissive uniformly doped GaAsP photocathode, *Appl. Opt.* 62 (2023) 8804–8810.

С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЯРКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ В ФОТОПУШКАХ

Особенностью динамики коротких ярких сгустков электронов при эмиссии из фотокатода является преобладающее влияние их собственного поля. Это вызвано как очень высокой интенсивностью (сотни пКл – единицы нКл в сгустке при длительности доли-единицы пс), так и низкой энергией эмиссии, составляющей единицы эВ. В докладе рассмотрены особенности построения алгоритмов для численного решения самосогласованного уравнения движения для данной задачи.

S.M. POLOZOV, V.I. RASHCHIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ON SOME FEATURES OF HIGHT BRIGHTNES ELECTRON BUNCHE DYNAMICS IN PHOTOCATHODES

The influence of the space charge field determines the beam dynamics peculiarities for the photoguns. It is caused both by the high bunch intensity (from hundreds pC to a number nC for the bunch time duration from tenth to a number of ps) and the very low emission energy (few eV). The features of designing a self-consistent algorithm for solving the problem of an intense electron bunch dynamics in a photoguns are discussed.

Как известно, многие задачи современной ускорительной физики связаны с необходимостью генерации коротких высокоинтенсивных сгустков электронов. Такие сгустки необходимы для мощных лазеров на свободных электронах с энергиями пучка в несколько ГэВ, а также для компактных источников излучения, в которых энергии составляют до нескольких десятков МэВ. Оба класса ускорителей требуют получения ярких сгустков электронов с зарядом до нескольких нКл при длительности не более нескольких пс. Таким образом, пиковый ток в сгустке может составлять несколько сотен ампер. Для получения таких сгустков чаще всего используются СВЧ электронные пушки с фотокатодом, для которых длительность токового импульса будет примерно равна длительности импульса лазера. Особенностью фотоэмиссии является также очень низкая энергия электронов, вылетающих из катода, составляющая всего несколько эВ. В данной ситуации квазистатическая составляющая собственного поля сгустка будет оказывать определяющее влияние на динамику сгустка на первых нескольких миллиметрах траектории, пока энергия электронов не достигнет нескольких сотен кэВ.

В настоящее время практически все программы для численного моделирования динамики пучков в линейных ускорителях используют для учета квазистатической составляющей собственного поля метод «частица в ячейке» (Particle-In-Cell, PIC) и его различные модификации. К задаче динамики пучка в СВЧ фотопушке в процессе эмиссии и при движении около катода данный метод вычисления поля пространственного заряда сгустка в его собственной системе координат не может быть применен впрямую из-за особенностей постановки граничных условий. Традиционно в PIC методе используют граничные условия Дирихле по поперечным координатам и периодические продольные граничные условия. Период принято выбирать равным периоду СВЧ поля. К сожалению, периодические граничные условия для СВЧ пушки с фотокатодом не применимы, так как эмиссия происходит из проводящей (электрической) стенки, а период СВЧ поля слишком велик по сравнению с длительностью сгустка. В докладе будут рассмотрены особенности построения алгоритмов для решения данной задачи, а также приведены первые результаты моделирования динамики ярких сгустков, полученные с помощью новой версии программы BEAMDULAC-RF_gun_8.

ОБЪЕДИНЕНИЕ СЕКЦИЙ СТРУКТУРЫ SDTL В РЕЗОНАНСНУЮ СИСТЕМУ

Преимущества применения коротких секций ускоряющих структур, объединенных в единый резонатор, хорошо известны в технологии линейных ускорителей ионов [1]. В работе рассмотрены вопросы объединения секций структуры Separated Drift Tube (SDTL) в единый резонатор. Рассмотрены свойства системы резонаторов, связанных щелями связи. Обоснован выбор и проведена оптимизация параметров ячеек связи (ЯС) для различных диапазонов рабочих частот. Приведены методики корректировки размеров элементов для обеспечения необходимых частот. Приведен пример объединения коротких секций SDTL в резонатор на частоте 325 МГц на участке низких энергий протонов и приведены его расчетные характеристики.

I.V. RYBAKOV, V.V. PARAMONOV
Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SECTIONS UNIFICATION OF THE SDTL STRUCTURE INTO A RESONANT SYSTEM

The advantages of using short sections of accelerating structures combined into a single resonator are well known in the technology of linear ion accelerators [1]. The paper considers the issues of combining sections of the Separated Drift Tube (SDTL) structure into a single resonator. The properties of the resonator system connected by coupling slots are considered. The selection and optimization of the parameters of the coupling cells (CC) for different ranges of operating frequencies are substantiated and performed. Methods for adjusting the dimensions of elements to ensure the required frequencies are presented. An example of combining short SDTL sections into a resonator at a frequency of 325 MHz in the region of low-energy protons is given, and its calculated characteristics are presented.

Для объединения секций SDTL в резонатор во всех диапазонах рабочих частот и энергий ионов, в которых целесообразно применения структуры, необходимы как модель описания свойств связанный системы, так и оптимизация элементов связи. Модель приближенного анализа сформулирована на основе одномодового приближения связанных щелями связи элементов. Для SDTL в области низких частот наиболее эффективной является цилиндрическая ЯС с сильной емкостной нагрузкой на колебании TM010. Такая ЯС определяет вид $\pi/2$ рабочего колебания в резонаторе и минимальная длина ЯС $L=n\beta\lambda/2 < 0.62\lambda$ где n - нечетное целое и λ - длина рабочей волны, определяется габаритами фокусирующих элементов. Проведенная оптимизация размеров ЯС позволяет выбирать варианты как с уменьшенными поперечными размерами, так и наибольшей напряженностью магнитного поля H ЯС в месте щели связи, что ведет к увеличению коэффициента связи в резонаторе.

Введение щелей связи в секции SDTL и ЯС с необходимостью ведет к понижению их частот. Необходима корректировка расчетных размеров элементов резонатора. Для секций корректировка проводится в минимальной сборке из секции с половинами прилегающих ЯС изменением внешнего радиуса дисковых выступов на торцевых стенках секций, так же примененных в [2]. Корректировка частот ЯС, после корректировки частоты секции, ведется уменьшением длины емкостного зазора в ЯС по симметричному по частоте расположению двух колебаний относительно рабочего. Достигается как настройка резонатора на рабочую частоту, так и симметричное относительно рабочей моды расположение боковых колебаний. Сформированный таким образом резонатор на частоте 325 МГц из пяти секций, предлагаемых в [3] для ускорения протонов от 4 МэВ до 6,02 МэВ, и распределение ускоряющего поля по оси показаны на рис. 1.

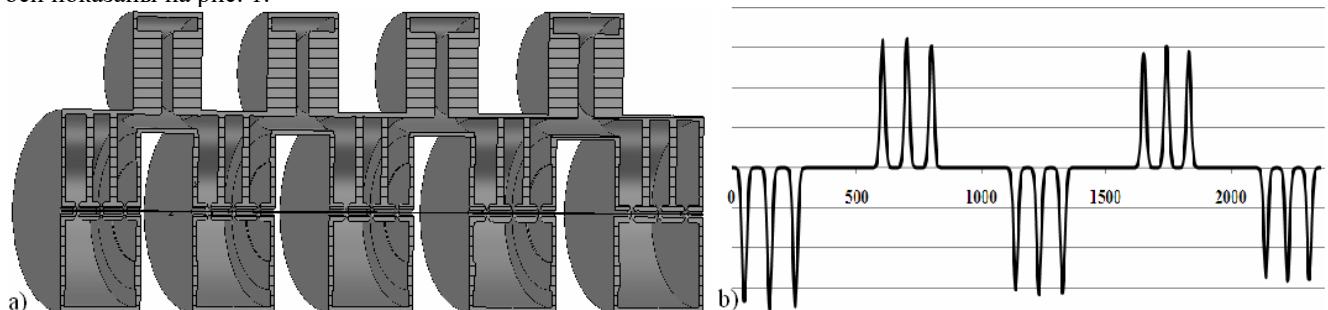


Рис. 1. Резонатор SDTL, $L=5\beta\lambda/2$ (а) и распределение Ez по оси резонатора (б).

При увеличении числа объединяемых секций возрастает ширина полосы расщепления боковых мод относительно рабочей частоты. Количество секций практически ограничивается мощностью ВЧ генератора.

Список литературы

1. Б.П. Мурин (ред.) Линейные ускорители ионов, т.2, М. Атомиздат, 1978
2. И.В. Рыбаков, В.В. Парамонов // Ядерная физика и инженеринг, том 15, № 5, с. 52–55, 2024
3. V. V. Paramonov, et al. // arXiv:2309.11431 [physics.acc-ph] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.11431>, 2023

Н.Ю. САМАРОКОВ, М.В. ЛАЛАЯН, С.М. ПОЛОЗОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАСЧЕТ И НАСТРОЙКА СИЛЬНОТОЧНОГО ФОТОЭМИССИОННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

Представлены результаты исследований, направленных на создание ускоряющей структуры и ввода мощности для 1,5 ячеичной фотопушки. Представлены результаты численного моделирования электродинамических характеристик и параметры ввода мощности.

N.YU. SAMAROKOV, M.V. LALAYAN, S.M. POLOZOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CALCULATION AND TUNING OF A HIGH-CURRENT PHOTOEMISSION SOURCE OF ELECTRONS

The results of research aimed at creating an accelerating structure and power input for a 1.5 cell photogun are presented. The results of numerical simulation of electrodynamic characteristics and power input parameters are presented.

Фотопушка представляет собой полутораячеечную осесимметричную структуру,ирующую на π виде колебаний типа E_{01} , рабочая частота ячеек 2450 МГц. Установки такого типа являются наиболее простыми в изготовлении, а также не сильно уступают в уровне выходной энергии частиц структурам, работающим на других типах колебаний и модах, при этом позволяют добиваться максимального градиента ускорения [1]. Медная стенка первой полужачейки является фотокатодом. Излучение лазера вводится в фотоинжектор через коаксиальный волновод, чей центральный проводник является полым и служит для вывода ускоренных электронов для последующего ускорения. Центральный проводник является закритическим на рабочей частоте резонаторов ускоряющей структуры.

Для того чтобы динамика пучка подчинялась законам электронно-лучевой оптики, а не его пространственным зарядом необходимо как можно скорее придать частицам релятивистские энергии [2]. Ячейки представляют собой обыкновенные цилиндрические резонаторы со скруглениями. В результате настройки удалось добиться следующего значения добротности: $Q = 18861$. Соотношение пиков полей в ячейках на рабочей частоте колебаний настраивалось как 1:1.

При настройке ввода мощности в фотопушку было рассмотрено два варианта перехода с прямоугольного волновода на коаксиальный. В первом варианте использовалась геометрия совмещающая коническое расширение внутренней части коаксиала и симметричную ступеньку [3 – 6], во втором же варианте ступенька отсутствовала. В результате в обоих случаях удалось получить низкий коэффициент отражения, однако в случае со ступенькой в коаксиале всегда возникала стоячая волна. В результате было решено отказаться от данного варианта. Ниже на рисунке 1 представлена итоговая геометрия фотопушки. Представленный фотоэмиссионный источник электронов на данный момент находится в производстве.

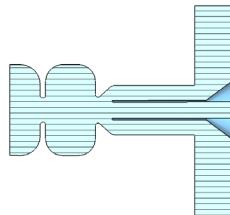


Рис. 1. Итоговая геометрия фотопушки

Список литературы

1. Ashanin I. A. et al. Design and Testing of the Photogun Resonator and Biperiodic Accelerating Structure with Traveling Wave for the Photoinjector at the IAP RAS //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2023. – Т. 66. – №. 7. – С. 504-512.
2. Ершов А. Б. и др. Расчет динамики пучка заряженных частиц в фотоинжекторах в различных программах численного моделирования //Москва. – 2024. – Т. 26. – С. 338.
3. Ашанин И. А. и др. Разработка концепции Российского Специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4 НИЦ "Курчатовский институт" //Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9. – №. 2. – С. 192-199.
4. Ashanin I. A. et al. Beam dynamics simulation in a linear electron accelerator-injector for the 4th generation specialized synchrotron radiation source USSR //Proc. 27th Russ. Particle Accelerator Conf. RuPAC'2021, Alushta, Russia. – 2021. – С. 149-152.
5. Kliuchevskaia Y. D., Polozov S. M. Optimal RF-photogun parameters for the new injection linac for USSR project //CERN-Proceedings. – 2021. – С. 319-321.
6. Ashanin I. A. et al. The SYLA Linear Electronic Accelerator-Injector for a Specialized Source of Synchrotron Radiation of the Fourth Generation //Moscow University Physics Bulletin. – 2023. – Т. 78. – №. 1. – С. 48-56

Р.А. ЗБРУЕВ, А.А. БАТОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, М.В. ЛАЛАЯН, М.В. ВЛАДИМИРОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВЧ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЭНЕРГИЮ 8 МЭВ

В работе описаны мероприятия, проводимые в процессе изготовления двухсекционной ускоряющей структуры для проекта линейного ускорителя электронов прикладного назначения. Получены теоретические зависимости электродинамических характеристик от геометрических параметров СВЧ элементов. Измерены значения этих характеристик для изготовленной структуры.

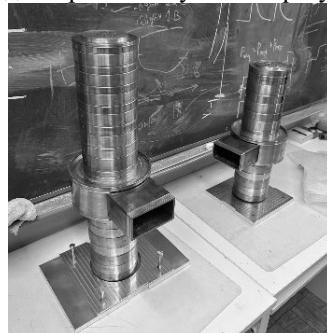
R.A. ZBTRUEV, A.A. BATOV, S.M. POLOZOV, M.V. LALAYAN, M.V. VLADIMIROV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MANUFACTURING OF RF-COMPONENTS FOR THE TWO-SECTION 8-MEV LINEAR ELECTRON ACCELERATOR FOR APPLIED RESEARCH

The report describes the process of manufacturing the two-section accelerating structure for the linear accelerator. Theoretical dependencies of electrodynamic parameters on geometric parameters of RF-components are obtained. The values of these characteristics for the manufactured structure are measured.

Линейные ускорители электронов играют важную роль в современной ускорительной технике. Благодаря достаточно полной теоретической проработке принципов создания и использования, обширным возможностям применения ускоренного пучка электронов этот тип установок используется как в фундаментальных и прикладных научных исследованиях, так и в различных отраслях промышленности (лучевая терапия [1,2], гамма-активационный анализ [3], стерилизация медицинских изделий [4]). Одним из приоритетных направлений применения ускорителей служат исследования электронной компонентной базы на радиационную стойкость. Проект такой установки был разработан коллективом НИЯУ МИФИ [5] с использованием предыдущего опыта разработки ускорителей на стоячей волне на базе бипериодической ускоряющей структуры. Перед началом изготовления были исследованы зависимости (вариационные характеристики) электродинамических характеристик от геометрических параметров для расчетной модели.

Две секции, состоящие из 12 и 8 ячеек, вместе с согласующими диафрагмами и частью волноводного тракта были изготовлены. Во время изготовления на каждом этапе обработки и доводки изделий проводились измерения частоты и добротности с помощью векторного анализатора цепей ячеек на макетах из двух полуячеек, аналогичных расчетным моделям. Таким образом, применение двухэтапного процесса контроля необходимых значений электродинамических характеристик (использование расчетных зависимостей характеристик от геометрических параметров и непосредственное измерение значений характеристик) позволило изготовить структуру с хорошей сходимостью расчетных и экспериментальных значений параметров. Повторные измерения электродинамических характеристик, проведенные на базе НИЯУ МИФИ, подтверждают ранее полученные результаты.



Rис. 1. Изготовленные секции линейного ускорителя электронов перед проведением повторной серии измерений

Список литературы

1. Batov A. A. et al. Developing and Optimizing the S-Band Accelerating Structure and Coupling Device for the Radiation Therapy Facility //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С. 699-703.
2. Samarov N. Y. Optimization of Cathode Electrode Geometry //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 10. – С. 2271-2274.
3. Polozov S. M., Rashchikov, V. I., Demsky M. I., Beam dynamics in new 10 MeV high-power electron linac for industrial application //Proceedings of the 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia. – 2016. – С. 493-495.
4. Basyl D. S. et al. Commissioning and first tests of the new standing wave 10 MeV electron accelerator //Proceedings of the 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia. – 2016. – С. 173-175.
5. Батов А. А., Збруев Р. А. и др. Разработка двухсекционного линейного ускорителя электронов прикладного назначения на энергию 8 МэВ // Сборник научных трудов X Международной конференции ЛАПЛАЗ-2024, Москва. – 2024. – т. 26. – с. 328.

С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ¹, Ю.В. СЕНИЧЕВ¹, А.Е. АКСЕНТЬЕВ^{1,2}, А.А. МЕЛЬНИКОВ^{1,3}

¹ Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³ Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

ДУАЛЬНАЯ МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ ЛЁГКИХ И ТЯЖЁЛЫХ ЧАСТИЦ

Разработана дуальная магнитооптическая структура для ускорения как тяжёлых ионов, так и лёгких поляризованных протонов и deutронов. Структура может быть оптимизирована для минимизации внутрипучкового рассеяния при ускорении тяжёлых частиц и обеспечения стабильности пучка при прохождении критической энергии для лёгких частиц, расширяя возможности установки.

S.D. KOLOKOLCHIKOV¹, YU.V. SENICHEV¹, A.E. AKSENTYEV^{1,2}, A.A. MELNIKOV^{1,3}

¹ Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

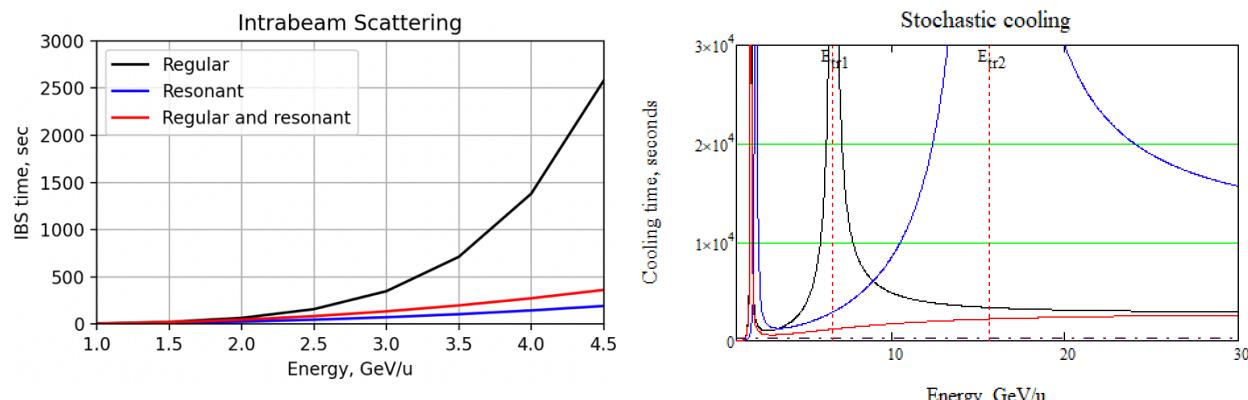
³ Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia

DUAL-PURPOSE MAGNETO-OPTICAL STRUCTURE FOR LIGHT AND HEAVY PARTICLES

A dual-purpose magneto-optical structure has been developed for the acceleration of both heavy ions and light polarized protons and deuterons. The structure can be tuned to minimize intra-beam scattering for heavy ions and ensure beam stability during transition energy crossing for light particles, expanding experimental capabilities.

Рассмотрена двухцелевая магнитооптическая структура, предназначенная для ускорения как тяжёлых ионов (например, золота), так и лёгких поляризованных протонов и deutронов. Гибкость настройки параметров структуры позволяет адаптировать её для работы с частицами, имеющими различные соотношения заряда к массе.

Для тяжёлых ионов приоритетом является минимизация внутрипучкового рассеяния (ВПР), которое приводит к росту эмиттанса и снижению светимости. Этого удается достичь за счёт применения регулярной магнитооптической структуры с минимальной модуляцией (рис. 1). Кроме того, для компенсации ВПР используются методы стохастического (рис. 2) и электронного охлаждения, позволяющие поддерживать стабильные параметры пучка на протяжении длительного времени [1, 2].



При ускорении лёгких поляризованных частиц ключевым фактором становится необходимость прохождения критической энергии, что может привести к нарушению фазовой стабильности и потере пучка. В резонансной структуре это решается путём модуляции дисперсионной функции, достигаемой введением дополнительного семейства квадрупольных линз с варьируемыми градиентами [3].

Гибкость структуры заключается в сочетании подходов, позволяющих обеспечивать контроль над ВПР для тяжёлых частиц и стабилизировать пучок при переходе через критическую энергию для лёгких частиц. Это делает структуру универсальной для проведения коллайдерных экспериментов. Данная работа рассмотрена в рамках модернизации ускорительного комплекса Нуклotron-НИКА.

Список литературы

1. D. Möhl, G. Petrucci, L. Thorndahl, S. van der Meer, Physics Reports, 58 (1980), 75.
2. S.-Y. Lee, Accelerator Physics (Fourth Edition), World Scientific Publishing Company, 2018.
3. Y.V. Senichev, A.N. Chechenin, Theory of Resonant Lattices for Synchrotrons with Negative Momentum Compaction Factor, J. Exp. Theor. Phys. 105, 988–997 (2007).

А.Н. ЮНАКОВ, Д.А. КОМАРОВ
АО «Научно производственное предприятие «Исток», Москва, Россия

СВЕРХМОЩНЫЕ КЛИСТРОНЫ ДЛЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В работе дан обзор современного состояния клистронной техники для крупных ускорительно – накопительных комплексов физики высоких энергий. Сформулированы современные требования к аппаратуре на примере комплекса синхротронного излучения «СИЛА». Рассмотрены основные физические проблемы, не решенные на данный момент, в разработке клистронов.

A.N. UNAKOV, D.A. KOMAROV
FSU "Istok", Moscow, Russia

HEAVY-POWER KLYSTRONS FOR HIGH-ENERGY PHYSICS: THE STATE OF THE PROBLEM

The paper provides an overview of the current state of klystron technology for large accelerator–storage complexes of high-energy physics. Modern requirements for the equipment are formulated using the example of the SILA synchrotron radiation complex. The main physical problems that have not been solved at the moment in the development of klystrons are considered.

В качестве источника СВЧ мощности для крупных ускорительных комплексов используют клистронные усилители в связи с рядом факторов: высокая стабильность частоты СВЧ сигнала, простота управление мощностью клистронного усилителя входным сигналом низкого уровня, отсутствие побочных колебаний и т.д. На сегодняшний день определились два основных направления разработки клистронов: создание классических однолучевых приборов с фокусировкой полем соленоида, или электромагнита, и создание многолучевых клистронов (МЛК) с фокусировкой постоянными магнитами. Если для клистронов систем связь и локации преимущество давно перешло к многолучевым системам в связи с тем, что увеличение суммарного тока позволяет обеспечить рекордные полосы усиления, то в области сверхмощных приборов еще остаются вопросы выбора того, или иного типа приборов. В недавнем совместном обзоре специалистов в области СВЧ электроники из КНР и США, абсолютное преимущество для современных ускорительных центров отдано МЛК [1].

По оценке специалистов ЦЕРН основные затраты на электроэнергию приходятся на станции СВЧ питания (более 70% стоимости всех затрат (рис.1)). Повышение электронного КПД выше 50% позволяет кратно уменьшить электропотребление комплекса

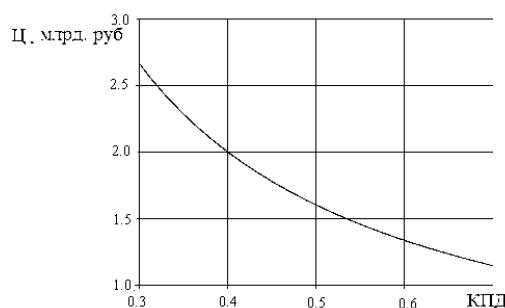


Рис. 1. Зависимость стоимости электроэнергии УНК от электронного КПД клистрона

Единственным прямым путем увеличения КПД, как было сказано выше, является уменьшение микропервеанса луча, а это напрямую указывает на необходимость перехода к многолучевым клистронам. При этом есть возможность не только снизить микропервеанс, но и существенно снизить напряжение питания. С целью унификации была выбрана схема МЛК на 38 лучей, с микропервеансом на луч 0,4, при напряжении катода не более 100 кВ и суммарном токе катода 470 А в импульсе. Использование катода диаметром 8,6 мм дает плотность тока с катода не более 18 А/см², что при скважности 1000, как показывают результаты наработки аналогичных приборов, обеспечит долговечность не менее 10 000 часов. Рассмотренный метод повышения электронного КПД клистронов позволяет обеспечить для многолучевых систем теоретически предельные уровни в 80%, а в эксперименте позволяют рассчитывать на значения больше 60 %. Расчеты проведены по программе KLYS WIN, 1.5 D, в самосогласованной постановке.

Список литературы

1. Y. Ding, D. Abbe, B. Shen, D. Gao, H. Ding An Overview of Multibeam Klystron Technology, IEEE TED, vol.70, No.6, p. 2656 – 2665, June 2023.

Р.А. ОСИН^{1,2}, Д.А. КАЛАШНИКОВ¹, Д.А. КОМАРОВ¹, Д.С. ТРОФИМОВ¹

¹ Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Торий», Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

КАЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТУРА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В МОЩНОМ КЛИСТРОННОМ УСИЛИТЕЛЕ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

В данной работе по результатам трехмерного моделирования была получена зависимость продольной компоненты электрического поля, а также распределение скоростей частиц вдоль оси прибора. Проведен расчет траектории краевого электрона, найдена зависимость величины тока от продольной координаты, которая была соотнесена с фазовыми характеристиками, рассчитанными в одномерной программе.

R.A. OSIN^{1,2}, D.A. KALASHNIKOV¹, D.A. KOMAROV¹, D.S. TROFIMOV¹

¹ Joint-Stock Company "Toriiy" Scientific Production Association", Moscow, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

QUALITATIVE DETERMINATION OF THE ELECTRON FLOW CONTOUR IN A POWERFUL KLYSTRON AMPLIFIER WITH DYNAMIC OPERATION

In this paper, as well as the distribution of particle velocities along the axis of the device, the dependence of the longitudinal component of the electric field was obtained based on the results of three-dimensional modelling. The trajectory of the edge electron was calculated and the dependence of the current magnitude on the longitudinal coordinate was found. It has been correlated with the phase characteristics calculated in a one-dimensional program.

Одним из факторов успешной работы электровакуумных приборов СВЧ О-типа (клистронов, ЛБВ) является качественная настройка электронно-оптической системы (ЭОС). С ее помощью обеспечивается транспортировка электронного потока в пролетном канале. В зависимости от наличия высокочастотного (ВЧ) сигнала на входе, различают два режима работы данных приборов: статический режим (ВЧ сигнал на входе отсутствует) и динамический режим (с ВЧ сигналом на входе). В последнем в результате взаимодействия потока электронов с ВЧ полем электродинамической системы (ЭДС) скорости электронов в пролетных каналах изменяются, что приводит к модуляции электронного потока по плотности пространственного заряда и образованию неоднородностей в виде густиков.

На практике, проектирование электровакуумных приборов требует комплексного подхода и состоит из нескольких расчетных этапов. Разработка ЭОС основывается на симуляции статического режима работы изделия, а ЭДС – на симуляции динамического режима. Анализ траекторий электронов производится только в первом случае. В свою очередь, расчет динамического режима делится на два этапа: определение предварительных параметров ЭДС с применением упрощенных одномерных программ и дальнейшее уточнение результатов в трехмерных программах. При этом одномерные программы не учитывают реальное токопрохождение. В ряде случаев этого бывает достаточно, так как разница расчетного и реального КПД приборов не превышает 10 %. Однако в мощных клистронах токопрохождение может стать главной причиной, ограничивающей выходные параметры прибора и отличие реального КПД может достигать 30-40 %. Для корректировки данного эффекта требуются длительные расчеты взаимодействия в трехмерных программах.

В работе рассмотрена возможность качественной оценки контура электронного потока при динамическом режиме работы прибора на основании продольного распределения тока, полученного из фазовой характеристики, и распределений скоростей электронов в фиксированный момент времени.

Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.А. МОРОЗОВА, А.Е. ШИКАНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МФИ», Москва, Россия

ДИАГНОСТИКА БЫСТРЫХ ИОНОВ НАНОСЕКУНДНОГО ПИНЧА С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИРОВАНИЕМ

Представлена диагностика высокозергетичных ионов (более 1 МэВ на частицу), эмиттируемых быстрым лазерно-индукцируемым искровым разрядом с электродами из кобальта в режиме его пинчевания с током ≈ 80 кА и энерговкладом ~ 120 Дж. Разряд инициировался лазерным излучением с энергией 50÷500 мДж в импульсе длительностью 10 нс. Отличительной особенностью разряда является нарастание тока до максимальной величины за время ≈ 100 нс. С помощью времязадержкой коллекторной методики зарегистрировано до 10^{10} ионов кобальта за один импульс в телесный угол 0,04 рад. Выполнены расчеты и разработан проект масс-спектрометра, оптимизированного под эксперимент для регистрации зарядового состава ионов.

E.D.VOVCHENKO, K.I. KOZLOVSKII, E.A. MOROZOVA, A.E.SHIKANOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

FAST ION DIAGNOSTICS OF NANOSECOND PINCH WITH LASER INITIATION

The paper presents diagnostics of high-energy ions (more than 1 MeV per particle) emitted by a fast laser-induced spark discharge with cobalt electrodes in the pinching mode with a current of ≈ 80 kA and an energy input of ~ 120 J. The discharge was initiated by laser radiation with an energy of 50-500 mJ in a pulse duration of 10 ns. A distinctive feature of the discharge is the increase in current to its maximum value within a time of ≈ 100 ns. Using the time-of-flight collector technique, up to 10^{10} cobalt ions were recorded per pulse in a solid angle of 0.04 rad. Calculations have been performed and a design for a mass spectrometer optimized for an experiment to record the charge composition of ions has been developed.

Одной из основных проблем при регистрации с помощью времязадержкой методики быстрых многозарядных ионов (МЗИ), образующихся в сильноточных разрядах из материала электродов, является наличие ионов водорода в диагностируемых пучках, поскольку небольшое количество водорода практически всегда присутствует в вакуумном объеме. В этих экспериментах скорость протонов может достигать величины $\approx 10^8$ см/с, сравнимой или в ряде случаев даже превышающей скорость самой быстрой компоненты МЗИ [1].

Для исключения попадания протонов на коллектор при регистрации МЗИ времязадержкой коллекторной методикой на пути коллимированного пучка создавалось внешнее поперечное магнитное поле с индукцией $\approx 0,1$ Тл. В работе выполнен расчет места его размещения по отношению к коллектору. При этом, во-первых, в этом месте сила Лоренца $F_L = evB$, действующая на протон, должна превышать силу электрического поля $F_e = eE$. Во-вторых, в результате изменения направления движения протонов они уже не попадали на входную апертуру коллектора, а оседали на стенках времязадержки канала с длиной 115 см. В этом эксперименте качестве материала анода и катода выбран кобальт с чистотой 99,9%, что исключало присутствие в разрядных электродах примесных атомов и изотопов. Исключение заметного осаждения водорода из вакуумного объема на поверхность электродов достигался за счет достаточно высокой скорости повторения импульсов (импульс за минуту).



Рис. 1. Осциллографмограмма сигналов

Верхний луч – ток разряда, средний луч – ток ионов на коллектор, нижний луч – импульс лазерного излучения.

В результате принятых всех мер определена максимальная и средняя скорость группы самых быстрых ионов кобальта (группа 1 на рис. 1) по времени прихода ионов на коллектор, соответственно через 200 и 250 нс по отношению к моменту глубокого пинчевания разряда. При этом оценка максимальной и средней скорости первой группы быстрых ионов дает 6×10^8 см/с и $4,5 \times 10^8$ см/с, что соответствует энергиям ионов 10 и 5 МэВ.

Скорее всего в первой группе быстрых ионов содержатся многозарядные ионы кобальта. Для проверки полученных результатов была выполнена разработка и расчет специального масс-спектрометра для ионов кобальта с зарядностью +10 - +20 и скоростями выше 10^8 см/с.

Список литературы

1. Козловский К.И., Вовченко Е.Д., Полозов С.М., Шиканов А.Е. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(254). С. 418–422

И.И. ПОЛОНИК^{1,2}, С.А. ГАВРИЛОВ^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

²Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ДЛЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ

Рассмотрена зависимость формы временного отклика интегрирующего трансформатора тока от емкости конденсаторов и материала ферритовых сердечников, вызванная частотной зависимостью магнитной проницаемости ферритов. Экспериментально подтверждена линейность амплитуды и независимость формы отклика от заряда сгустка, проведено моделирование временного и частотного откликов.

I.I. POLONIK^{1,2}, S.A. GAVRILOV^{1,2}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia*

²*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

DEVELOPMENT OF INTEGRATING CURENT TRANSFORMER FOR PICOSECOND ELECTRON BUNCHES

Dependence of the time response shape of an integrating current transformer on the capacitance of the capacitor and the ferrite cores material caused by the frequency dependence of the magnetic permeability of the ferrites is considered. The amplitude linearity and the response shape independence from the bunch charge are confirmed, time and frequency responses have been simulated.

При измерениях тока коротких импульсов (<1 нс) полоса пропускания классических индукционных датчиков тока оказывается недостаточной, для того чтобы обеспечить регистрацию формы и длительности импульса тока пучка. В этих случаях используется интегрирующий трансформатор тока (ИТТ) [1, 2], позволяющий измерять интегральный заряд в импульсе.

Принцип работы ИТТ (рис. 1) основан на том, что токи изображения импульса пучка, текущие по проводящему корпусу, заряжают интегрирующий конденсатор, который затем разряжается за время, существенно превышающее длительность первичного импульса, и этот вторичный сигнал может быть зарегистрирован стандартным индукционным датчиком тока, находящимся внутри корпуса. Длительность и форма вторичного сигнала при этом не зависят от параметров первичного импульса и определяются исключительно параметрами такой сборки: магнитными свойствами ферритовых сердечников (магнитной проницаемостью и тангенсом угла магнитных потерь), количеством витков сигнальной обмотки активного сердечника и ёмкостью конденсаторов, а амплитуда регистрируемого сигнала изменяется пропорционально заряду импульса. Таким образом, после соответствующей калибровки, например, с помощью цилиндра Фарадея, датчик может использоваться для абсолютных неразрушающих измерений заряда ультракоротких импульсов.

В данной работе проводится сравнение откликов ИТТ в зависимости от магнитной проницаемости ферритовых сердечников и емкости конденсаторов. Экспериментально подтверждена линейность амплитуды и независимость формы отклика от заряда сгустка. Обнаружено, что при использовании ферритов с ярко выраженной частотной зависимостью магнитной проницаемости отклик становится апериодическим.

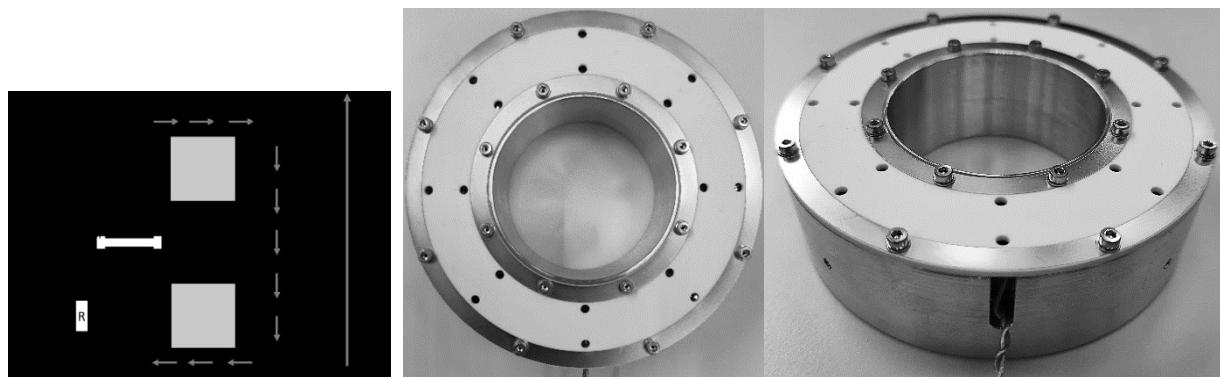


Рис. 1.

Схематичное устройство и собранный ИТТ

Список литературы

1. Unser K. B. // Design and preliminary tests of a beam intensity monitor for LEP, Proceedings of PAC, 1989.
2. Belohrad D. et al. // A new integrating current transformer for the LHC, Proceedings of IBIC, 2014.

В.Е.АМОСОВА^{1,2}, С.А.ГАВРИЛОВ^{1,2}

¹Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ПОЛОСКОВОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Описан процесс проектирования полоскового короткозамкнутого датчика положения пучка, который включал компьютерное 3D-моделирование и стендовые испытания прототипа. Рассчитаны параметры прототипа, влияющие на определение положения пучка.

V.E.AMOSOVA^{1,2}, S.A.GAVRILOV^{1,2}

¹The Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF THE STRIPLINE BEAM POSITION MONITOR

The design process of a shorted stripline beam position monitor is described, which included computer 3D modeling and bench tests of the prototype. The prototype parameters affecting the determination of the beam position are calculated.

В современных резонансных ускорителях положение центра масс пучка измеряется неразрушающим методом. Наиболее распространенными неразрушающими датчиками являются ёмкостные. Они состоят из четырех симметрично расположенных электродов, взаимодействующих с электромагнитными полями пучка и генерирующих электрические сигналы на своих выходных портах [1,2].

В работе проведено численное моделирование датчика положения и фазы пучка (ДПП) полоскового типа, а также разработан и протестирован прототип датчика. Геометрия оптимизировалась под ключевые параметры, влияющие на определение положения и фазы: волновое сопротивление полосковой линии, амплитуда сигнала, диапазон линейности, чувствительность, точность и разрешение. По результатам численного моделирования был изготовлен опытный образец, представленный на рисунке 1.

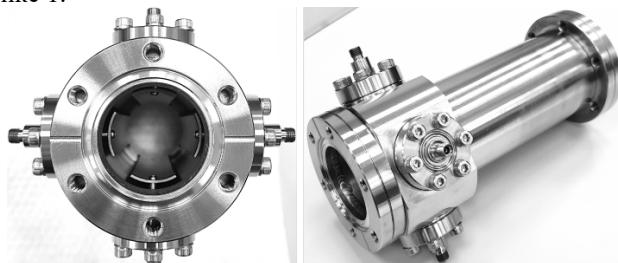


Рис. 1. Опытный образец полоскового датчика положения и фазы пучка

Анализ электродинамических характеристик датчика производился с помощью тестового стенда на основе линейного позиционера и провода для имитации пучка. Коэффициенты прохождения и отражения волн в порты ДПП из порта, имитирующего пучок, (S-параметры) были измерены векторным анализатором PLANAR C1409.

Для определения положения (координаты центра тяжести) пучка по данным тестового стенда использовались два подхода. Первый – процедура нормализации Δ/Σ (англ.: difference over sum), для которой нужно вычислить разность между напряжениями (или S-параметрами), индуцированными пучком на противоположных электродах $\Delta = U_1 - U_2$, и поделить полученное выражение на сумму напряжений Σ . Второй подход – логарифмическая обработка, состоящая во взятии логарифма от отношения U_1 и U_2 . По результатам испытаний на стенде были измерены чувствительность, область линейности и точность для каждого метода определения положения на разных частотах считывания сигнала. При процедуре Δ/Σ чувствительность равна 9.5%/мм, область линейности – 28 процентов апертуры, где среднеквадратичная ошибка определения координаты составила 67 мкм при считывании сигнала на 3 гармонике ускоряющей частоты. Для логарифмической обработки получены значения 1.7 дБ/мм, 48%, 57 мкм. Также было определено смещение электрического центра датчика относительно геометрического, вызванное асимметрией сборки и различием электродинамических характеристик разъемов: 64 и 39 мкм для Δ/Σ и логарифмической обработок соответственно.

Работа поддержана в рамках программы НЦФМ №6 «Ядерная и радиационная физика» (НЦФМ 6 2325-113).

Список литературы

1. Varnasseri, S., et al.: Design and fabrication of the stripline BPM at ESS-Bilbao // Proceedings of IBIC2012, MOPA31, Tsukuba, Japan, 2012.
2. Tan, J., et al. Commissioning of the CERN LINAC4 BPM System with 50 Mev Proton Beams // No. CERN-ACC-2013-0191. 2013.

И.Д. САДОФЬЕВ, М.П. ПАНИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ДО 6 ГЭВ ЧЕРЕЗ ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА СИНХРОТРОНА

Выполнено моделирование прохождения электронов с энергиями до 6 ГэВ через газовую мишень – вакуумную камеру накопительного кольца синхротрона. Получены спектральные и угловые характеристики тормозного и дельта-электронного излучений, рассмотрена радиационная обстановка в направлении распространения тормозного излучения.

I.D. SADOFEV, M.P. PANIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SIMULATION OF THE PASSAGE OF ELECTRONS WITH ENERGIES UP TO 6 GEV THROUGH THE VACUUM CHAMBER OF THE SYNCHROTRON STORAGE RING

The simulation of the passage of electrons with energies up to 6 GeV through a gas target – the vacuum chamber of the synchrotron storage ring – was performed. The spectral and angular characteristics of the bremsstrahlung and delta-electron radiation were obtained, and the radiation situation in the direction of propagation of the bremsstrahlung radiation was considered.

Выполнены расчеты радиационных полей, создаваемых электронным пучком с энергией электронов до 6 ГэВ при прохождении через газовую мишень, имитирующую вакуумную камеру накопительного кольца синхротрона. Примерами синхротронов с энергией электронов 6 ГэВ служат комплекс ESRF (Франция) и синхротрон-лазер СИЛА (Россия). Рассмотрена радиационная обстановка в пределах канала накопительного кольца синхротрона, учтены вторичные заряженные частицы и фотонейтроны, образованные вследствие развития электромагнитных каскадов в совокупности с фотоядерными реакциями. Моделирование выполнялось методом Монте-Карло с помощью программного пакета GEANT4. Приводятся результаты для мощности эффективной дозы, а также угловые и спектральные распределения фотонного, электронного, позитронного и нейтронного излучений вблизи вакуумной камеры накопительного кольца синхротрона. Данные по мощности эффективной дозы общего облучения получены на основе расчета плотности потока и переходных коэффициентов, приведенных в 119 Публикации ICRP [1].

Угловое распределение газового тормозного излучения резко анизотропное. Характерный угол, содержащий 50% излучения по суммарному потоку частиц, оценивается величиной 0.0049 град.

Расчетами показано, что мощность дозы за счет газового тормозного излучения, приходящуюся на единичный ток пучка первичных электронов, достигает 80 мкЗв/ч·мА на оси вакуумной камеры вблизи неё. При этом мощность дозы тормозного излучения в направлении распространения пучка тормозного излучения вблизи стены канала составляет до 324 мкЗв/ч·мА на оси пучка, до 0.15 мкЗв/ч·мА в пределах 10 см от оси пучка и до 0.01 мкЗв/ч·мА на расстоянии 1 м от оси пучка. Основными дозообразующим излучением вблизи оси пучка являются гамма-кванты, на расстояниях более 10 см преобладают нейтроны с мощностью дозы до 0.674 мкЗв/ч·мА.

Показано, что конструкция защитных сооружений канала, состоящая из свинцового поглотителя толщиной 10 см и бетонной стены толщиной 1 м, обеспечивает мощность эффективной дозы за окончанием линии вывода СИ не выше 0.014 мкЗв/ч·мА.

Список литературы

1. ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).

Р.А. ЗБРУЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Представлены промежуточные результаты расчетов магнитной системы, которую предполагается использовать для создания на мишени пучка нужной конфигурации в проекте линейного ускорителя электронов на энергию 8 МэВ. Описаны дальнейшие планы по разработке системы.

R.A. ZBTRUEV, S.M. POLOZOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

PRELIMINARY CALCULATION OF THE MAGNETIC BEAM FOR A LINEAR ELECTRON ACCELERATOR TRANSPORT CHANNEL SYSTEM

Preliminary results of the magnetic system simulation are presented. The system supposed to be used for forming beams of the desired configuration on target for an 8 MeV linear electron accelerator. Further plans for the development are described.

Ускорители заряженных частиц выступают одним из наиболее часто используемых видов устройств, применяемых для решения задач в области прикладных исследований в современном мире. В данный момент на кафедре Электрофизических установок НИЯУ МИФИ ведутся работы по проекту ускорителя для проведения исследований по оценке стойкости аппаратуры к воздействию излучением [1]. Для данного направления исследований существует ряд технических требований, которые заказчик предъявляет к пучку – однородность по плотности потока, форма и размер пучка на мишени. Одной из систем, позволяющей выполнить эти требования, является магнитная система канала транспортировки, позволяющая регулировать параметры пучка электронов после процесса ускорения.

В качестве магнитной системы было решено рассмотреть три секступольных магнита, расположенных под углом относительно плоскости, параллельной траектории пролета частиц. Для проведения предварительного расчета использовался модуль из пакета BEAMDULAC-BL, разрабатываемый коллективом кафедры Электрофизических установок [2,3]. В качестве начальных условий для задачи использовались полученные ранее результаты исследования динамики в ускорителе. Эти исследования также проводились с помощью программы BEAMDULAC-BL, что позволяет значительно сократить время на согласование и преобразование данных.

Предварительное исследование включало в себя подбор геометрических параметров канала транспортировки (расположение секступольных магнитов, их длина), а также подбор значений секступольных градиентов магнитов. С помощью интерфейса программы BEAMDULAC-BL проводился контроль изменения профиля пучка и однородности по плотности потока, таким образом удалось достигнуть расчетного пучка с необходимыми параметрами. Полученные значения градиентов и продольных размеров магнитов используются для моделирования магнитной системы. В данный момент проводится настройка и оптимизация геометрии секступольных магнитов. В дальнейшем, после реализации согласованных с предварительными расчетами моделей, планируется сравнение профилей пучка на выходе из канала транспортировки для предварительного и финального расчета.

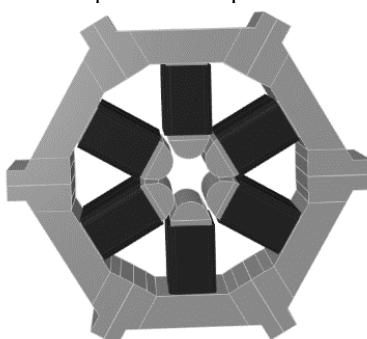


Рис. 1. Модель секступольного магнита канала транспортировки пучка

Список литературы

1. Батов А. А., Збруев Р. А. и др. Разработка двухсекционного линейного ускорителя электронов прикладного назначения на энергию 8 МэВ // Сборник научных трудов X Международной конференции ЛАПЛАЗ-2024, Москва. – 2024. – т. 26. – с. 328.
2. Bondarenko T. V., Masunov E. S., Polozov S. M. BEAM-DULAC-BL Code for 3D Simulation of Electron Beam Dynamics Taking into Account Beam Loading and Coulomb Field // Вопросы атомной науки и техники. – 2013. – V. 6. – P. 114–118.
3. Masunov E. S., Polozov S. M. BEAMDULAC code for numerical simulation of 3D beam dynamics in a high-intensity undulator linac // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – Т. 558. – №. 1. – С. 184-187.

А.В. ЗИЯТДИНОВА^{1,2,3}

¹НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ВАРИАНТ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУЧКА ПРОТОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Разработан вариант низкоэнергетического канала транспортировки пучка протонов для ускорительного комплекса медицинского назначения ЛУЧ-Протон, создаваемого в НИЦ КИ в рамках программы синхротронно-нейтронных исследований при жестких геометрических ограничениях. Создана модель соленоида для использования в данном канале. Проведено моделирование динамики пучка протонов в «идеальных» и «реальных» полях соленоидов. Получено 4-мерное согласование пучка с аксентансом последующего ускорителя типа RFQ.

A.V. ZIYATDINOVA^{1,2,3}

¹NRC Kurchatov institute, Moscow, Russia

²NRC Kurchatov institute - PNPI, Gatchina, Leningradskaya Oblast, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

VARIANT OF LEBT FOR MEDICAL PROTON LINAC

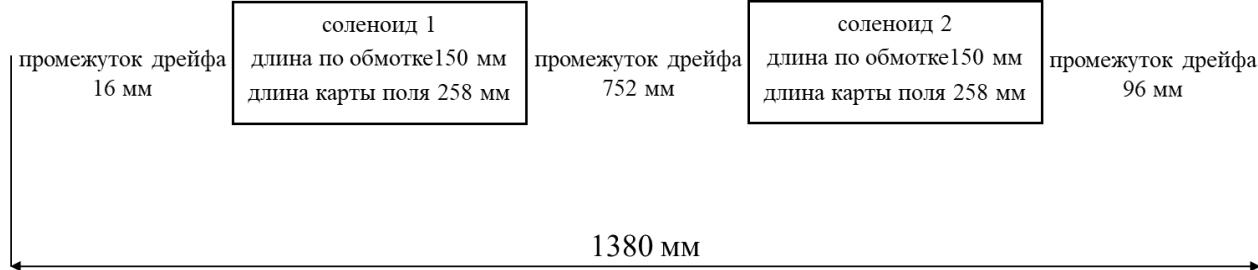
Variant of LEBT for medical proton linac (as a part of LUCH-Proton medical accelerator complex, which is being created at the KI Research Center within the framework of the synchrotron-neutron research program) has been developed under strict geometric constraints. A solenoid model has been created for use in the channel. Proton beam dynamic simulation for «ideal» and «real» solenoid field distribution was carried out. 4-dimension matching of proton beam with downstream RFQ was reached.

Низкоэнергетический канал транспортировки пучка предназначен для согласования пучка протонов, получаемого из источника ионов с ускоряющей структурой RFQ. На входе в канал поступает пучок протонов током 30mA с энергией 45кэВ и нормализованным 90% эмиттансом 0,5 π·мм·мрад.

Требования, поставленные при разработке канала транспортировки пучка низкой энергии:

- 4-мерное согласование пучка с ускоряющей структурой RFQ;
- минимизация потерь пучка в канале;
- минимизация роста поперечного эмиттанса пучка в канале – рост эмиттанса не должен превышать 50%;
- необходимость включения в тракт вакуумной системы и системы диагностики пучка;
- расстояние между торцами магнитного элемента и входным фланцем RFQ должно быть достаточным для монтажа необходимого оборудования;
- унификация элементов тракта;
- длина канала не должна превышать 1,5 м.

На рисунке 1 приведена схема разработанного канала.



Rис. 1. Схема разработанного канала транспортировки пучка протонов

Расстояние между центрами соленоидов 1,010м. Расстояние от точки вывода пучка до центра первого соленоида составляет 0,145м, расстояние между центром второго соленоида и точкой передачи пучка в RFQ составляет 0,225м. Такое расположение элементов транспортной системы позволяет смонтировать необходимое оборудование, а также расположить камеру диагностики, совмещенную с откачным постом, между соленоидами.

В.С. ДЮБКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

АКТУАЛИЗИРОВАННЫЙ КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ И ИОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Для транспортировки низкоэнергетических протонов и ионов с отношением атомной массы к заряду не более 3,2 от двух источников до входа в секцию линейного ускорителя с пространственно-однородной фокусировкой предложен магнитооптический канал, обеспечивающий высокий коэффициент токопрохождения по всем зарядам и согласование пучков на вход ускоряющей секции с учётом влияния их собственного пространственного поля (главным образом для протонов). Исследовано влияние погрешностей выставки магнитов и их полей на динамические характеристики транспортируемых пучков.

V.S. DYUBKOV

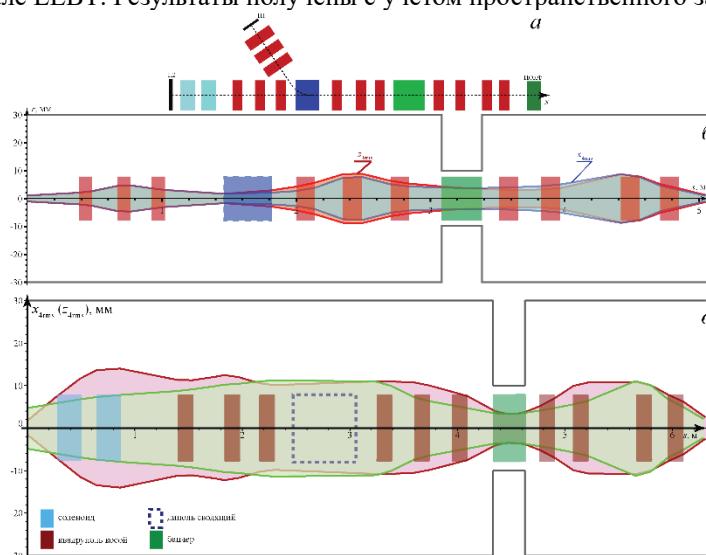
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

LOW ENERGY IONS TRANSPORT CHANNEL UPDATE FOR PULSED LINAC

For a transportation and matching proton and light ion beams (the maximal value A/Z is about 3.2) between particle sources and RFQ section entrance it is suggested updated low energy ions transfer line. That line should provide the highest beam transmission and beam matching taking into account space charge (mainly for protons). An influence of errors of the magnets on dynamical beams parameters was studied.

В Российской Федерации продолжается разработка и сооружение нескольких крупных ускорительных комплексов. Одним из них является крупный протонный и ионный синхротрон [1]. Один из инжекторов (ЛУ) для синхротрона, разрабатываемый в НИЯУ МИФИ, должен обеспечить ускорение протонов и лёгких ионов до энергии 7,5 МэВ/нуклон. ЛУ предусматривает два источника: ЭЦР на частоте 2450 МГц, для производства протонов и ионов гелия, и лазерный источник для производства лёгких ионов вплоть до Li. Для транспортировки заряженных частиц от источников до первой ускоряющей секции ЛУ и их согласования с ней, разработана актуализированная математическая модель магнитооптического канала транспортировки низкоэнергетических частиц LEBT (рис. 1а).

LEBT должен предусматривать размещение блоков диагностики пучков и банчера на частоте 81,25 МГц. Для вывода ионов на ось ЛУ будет использоваться дипольный магнит. Энергия заряженных частиц будет составлять 40 кэВ/нуклон, импульсный ток 2 мА для всех ионов и 6,5 мА для протонов. На рис. 1б представлены рассчитанные огибающие пучка ионов кислорода с $Z = +5$, а на рисунке 1в – протонного пучка и пучка ионов гелия в разработанном варианте канале LEBT. Результаты получены с учётом пространственного заряда пучков.



а) И1 – лазерный источник, И2 – источник протонов и гелия; б) 4rms огибающие пучка ионов $^{16}\text{O}^+$ (синяя – горизонтальная, красная – вертикальная); в) 4rms огибающие пучка протонов (красная) и ионов гелия (зелёная)

Рис. 1. Канал транспортировки низкоэнергетических протонов и лёгких ионов.

Список литературы

1. Polozov S.M. et al. The conceptual design of the 7.5 MeV/u light ion injector // Proc. of RuPAC21, Alushta, Russia, 2021, P. 51-54.

Б.С. ДЮБКОВ, И.А. ЮРИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАСЧЕТ ИМПЕДАНСОВ ВАКУУМНЫХ КАМЕР НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА СИЛА

Проведен расчет продольных и поперечных импедансов элементов вакуумных камер накопительного кольца СИЛА: фланцевого соединения, уравнителя зарядов, датчика положения пучка, откачного порта, поглотителя излучения. Рассчитан суммарный эффективный импеданс.

V.S. DYUBKOV, I.A. YURIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CALCULATION OF IMPEDANCES OF VACUUM CHAMBERS OF THE SYLA

The calculations of longitudinal and transverse impedances of vacuum chamber elements (flange joint, charge equalizer, beam position sensor, pumping port, radiation absorber) of the SYLA storage ring are presented. The total effective impedance is calculated.

Флагманским проектом Программы синхротронно-нейтронных исследований РФ является проект источника 4-го поколения на 6 ГэВ СИЛА, который будет состоять из синхротрона-накопителя и линейного ускорителя-драйвера, используемого как для инжекции в синхротрон, так и драйвера лазера на свободных электронах.

Для достижения проектных параметров электронных пучков в накопительном кольце (НК) необходимо изучить влияние наведённых полей пучком в оборудовании, расположенном на его орбите, поскольку наведённые поля могут оказывать существенное влияние на движение пучков, вплоть до их разрушения.

Регулярный суперпериод НК СИЛА более десятка вакуумных камер (ВК). Каждая ВК имеет уникальную геометрию в следствии размещения различного вакуумного оборудования, магнитов и наличия (отсутствия) каналов вывода синхротронного излучения (например, рис. 1).

Для подавления развития неустойчивостей (microwave, head-tail, intra-beam scattering и др.) необходимо минимизировать импедансы элементов НК, путем оптимизации или переработки их геометрии камер и материала. Рассмотрено несколько вариантов соединений камер, участков перехода от основного объёма камеры к фланцу и уравнители зарядов. Рассчитаны импедансы для датчика положения пучка, проведена оптимизация стенок ВК в местах расположения откачного порта с учетом эффективности откачки. Выполнен расчёт импедансов для поглотителей излучения.

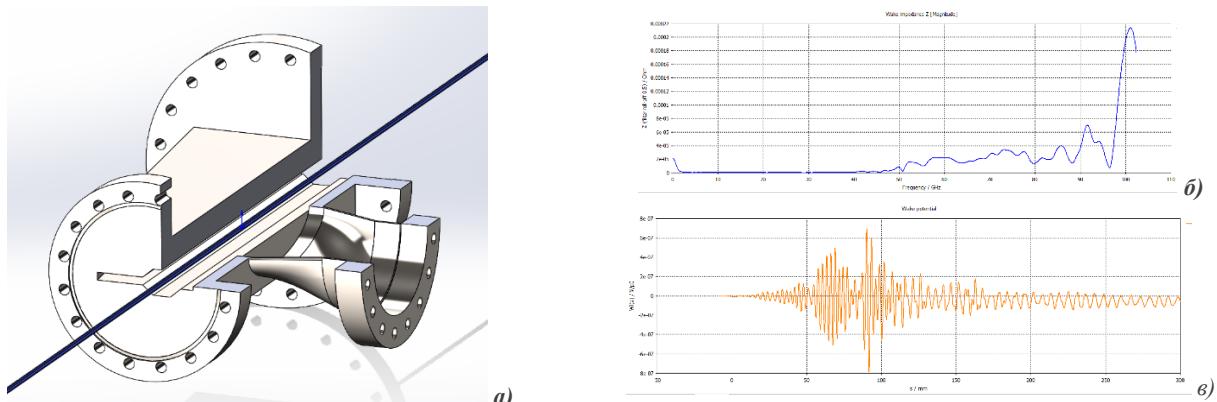


Рис. 1. а) Геометрия 12-й ВК регулярного суперпериода СИЛА; б) Продольный импеданс ВК; в) Распределение соответствующего wake-потенциала ВК.

Список литературы

1. M. Migliorati, L. Palumbo, C. Zannini, N. Biancacci, Resistive wall impedance in elliptical multilayer vacuum chambers // Phys. rev. AB 22, 121001 (2019)
2. A. W. Chao, Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators // Wiley, 1993
3. M. Korostelev, A. Wolski, Wake field simulations for the vacuum chamber transitions of the ILC damping ring Proc. PAC'09, Vancouver, BC, Canada

Г.О. БУЯНОВ, А.Р. КАРИМОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛН В ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ И ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМАХ

В рамках гидродинамического описания исследуется начальная стадия нелинейных цилиндрических ленгмюровских волн в изоэнтропической и изотермической плазменных средах. Для таких систем получено точное, частное решение которое описывает динамику электронов с учетом конечной температуры электронов. Установлены необходимые условия реализации регулярной динамики, а также проведен сравнительный анализ зависимостей электронной температуры для обоих исследуемых сред.

G.O. BUYANOV, A.R. KARIMOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

FEATURES OF DEVELOPMENT FOR CYLINDRICAL WAVES IN ISOENTROPIC AND ISOTHERMAL PLASMAS

Based on the hydrodynamic approach, the initial transient stage excitement of nonlinear cylindrical Langmuir waves in isoentropic and isothermal plasma media is investigated. For such system, the particular, exact analytical solution is found, the one describes the dynamics of electrons taking into account the finite temperature of electrons. In the cases under consideration, relations specifying the regular wave dynamics are derived, and the comparative analysis of electron temperature dependences is also carried out.

Вращающаяся плазма является одной из наиболее простых физических систем, демонстрирующая при этом необычные нелинейные волновые свойства, которые представляют значительный фундаментальный и прикладной интерес [1-3]. В рамках гидродинамического описания исследуется начальная стадия развития нелинейных цилиндрических ленгмюровских волн конечной амплитуды в изотермической и изоэнтропической плазменных средах, где ионы образуют неподвижный фон. Задача рассматривается в электростатической постановке для двухмерной геометрии. Используя частное, точное аналитическое решение уравнений гидродинамики, получена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику электронов с учетом конечной температуры электронов [4]. В настоящих расчетах использовался параболический по радиусу, вогнутый и выпуклый температурные профили связанные с меняющейся только по времени электронной плотностью. Для наглядности на рис.1 представлена динамика для вогнутого температурного профиля. В рамках данной модели обсуждается влияние начальных условий и тепловых эффектов на регулярную динамику возбуждаемых волн и развитие гидродинамических сингулярностей в электронном потоке. Получены оценки, задающие допустимый диапазон параметров плазмы, при которых реализуется либо регулярное поведение волны, либо происходит опрокидывание электронной волны. Показано, что развитие сингулярного поведения за счет собственной нелинейности можно избежать при учете тепловых эффектов и начального вращения электронного потока.

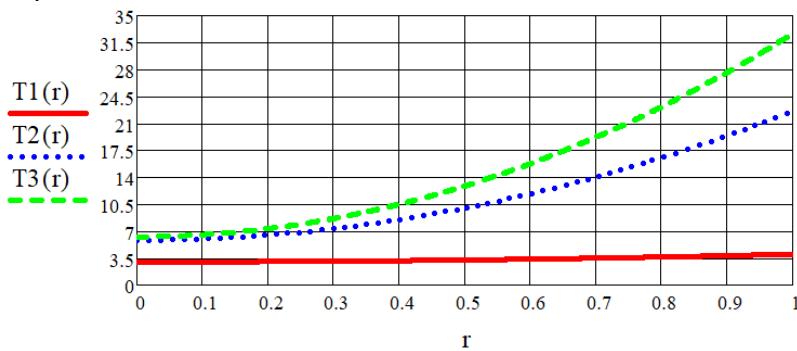


Рис. 1. Пример вогнутого температурного профиля

Из сравнения профилей в изотермической и в изоэнтропической плазме следует, что температура выше в изоэнтропической плазме. Данные результаты могут быть полезны для установления механизмов неравновесного переноса энергии/импульса в плазменных средах с конечной температурой электронов и ионов.

Список литературы

1. Davidson R.C. Methods in Nonlinear Plasma Theory – New York.: Academic Press, 1972. 384 p.
2. Akhiezer A. I., Akhiezer I. A., Polovin R. V., et al. Plasma Electrodynamics – Oxford.: Pergamon, 1975, Vol. 1
3. Anand M., Gibbon P., and Krishnamurthy M. Laser absorption in microdroplet plasmas // Europhysics Letters. – 2007. – V. 80. – P. 25002
4. Каримов А.Р., Буянов Г.О. Нелинейная динамика цилиндрических волн в изотермической плазме. Вестник НИЯУ МИФИ. 2024;13(6):373-379

Г.О. БУЯНОВ, А.Р. КАРИМОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

УРАВНЕНИЕ ЕРМАКОВА-ПИННИ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИЕ ВОЛНЫ В ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

В рамках гидродинамического описания предложена простая аналитическая модель для нелинейных цилиндрических ленгмюровских волн в изоэнтропической плазме с неподвижными ионами. Исходя из обобщения частного, точного решения для изотермической плазмы [1], получено уравнение типа Ермакова-Пинни, которое используется для анализа динамики волн. Установлены условия, определяющие как регулярную, так и сингулярную динамику волн.

G.O. BUYANOV, A.R. KARIMOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ERMAKOV-PINNY EQUATION AND CYLINDRICAL LANGMUIR WAVES IN ISOENTROPIC PLASMA

In the framework of hydrodynamics description, a simple analytical model for nonlinear cylindrical langmuir waves in isoentropic plasma with immobile ions is proposed. Proceeding from generalization of partial, exact solution for isothermal plasma [1], we get the equation of Ermakov-Pinny type which is used for analyzing the wave dynamics. Conditions specifying the regular as well as singular wave dynamics are derived.

В рамках гидродинамического описания исследуется динамика нелинейных цилиндрических ленгмюровских волн, возбуждаемых в изоэнтропической плазме, где ионы образуют неподвижный фон. Задача рассматривается в электростатической, осесимметричной, двухмерной постановке для плазменного цилиндра, чья высота много меньше начального радиуса. Используя обобщение частного, точного аналитического решения уравнений гидродинамики для изотермической плазмы [1], получена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику электронов с учетом конечной температуры электронов. В настоящей модели использовался параболический по радиусу, вогнутый/выпуклый температурный профиль, связанный с меняющейся только по времени электронной плотностью. Показано, что данная система обыкновенных дифференциальных уравнений сводится к обобщенному уравнению Ермакова-Пинни:

$$\frac{d^2W}{dt^2} + \frac{W}{2} = \frac{D_T}{W} + \frac{B_0^2}{W^3} \quad (1)$$

относительно $W = n^{-1/2}$, здесь n – плотность электронов, B_0 – начальное значение азимутальной скорости электронов, параметр $D_T = 1 \mp 4\beta_T^2/2$ отражает вид теплового слоя (знак минус в этом выражении соответствует вогнутому температурному профилю, знак плюс – выпуклому профилю) и влияние безразмерного теплового фактора β_T , представляющий собой отношение тепловой скорости электронов к характерной скорости задачи, выраженной через начальный радиус плазменного цилиндра и характерную ленгмюровскую частоту.

В случае $D_T = 0$ уравнение (1) сводится к классическому уравнению Ермакова-Пинни, имеющему элементарное аналитическое решение, с помощью которого и теоремы сравнения Чаплыгина об априорных оценках обыкновенных дифференциальных уравнений [2] удалось установить условия реализации регулярной и сингулярной динамики цилиндрической ленгмюровской волны.

Список литературы

1. Каримов А.Р., Буянов Г.О. Нелинейная динамика цилиндрических волн в изотермической плазме. Вестник НИЯУ МИФИ. 2024;13(6):373-379
2. Чаплыгин С.А. Избранные труды, Наука, М. – 1976.

В.Е. ЗАМЫШЛЯЕВА, Н.В. МАРКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ
Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Москва, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ПРОТОНОВ ПРОЕКТА DARIA

Представлены результаты обзора количества и состояния медицинских ускорителей для наработки медицинских радиоактивных изотопов в России. Произведен расчет потенциально нарабатываемых на протонном линейном ускорителе проекта DARIA активностей изотопа ^{18}F аналитически и при помощи программного пакета Radionuclide Yield Calculator. Представлены результаты расчетов и оценка возможности использования ускорителя для наработки изотопов в серийных масштабах.

V.E. ZAMYSHLYAEVA, N.V. MARKOV, T.V. KULEVOY
National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia

OBTAINING OF THE MEDICAL RADIOISOTOPES USING THE LINEAR PROTON ACCELERATOR OF DARIA PROJECT

The results of the review of the number and condition of medical accelerators for the production of radioactive isotopes for the needs of nuclear medicine in Russia are presented. The calculation of the ^{18}F isotope activities potentially generated at the proton linear accelerator of the Daria project was carried out analytically and using the Radionuclide Yield Calculator software package. The results of calculations are presented and the suitability of the accelerator for the production of isotopes on a serial scale is estimated.

В настоящее время большой потенциал, а следовательно, и большую популярность в научной среде имеют нейтронные исследования, однако нейтронными исследовательскими центрами являются крупные установки на основе реакторов, требующие большого количества разного рода ресурсов для их создания, эксплуатации и обслуживания. Проект Daria (Dedicated to Academic Research and Industrial Applications) – компактный источник нейтронов на базе линейного ускорителя протонов, предназначенный для проведения широкого спектра как фундаментальных, так и прикладных исследований с использованием потоков нейтронов различных энергий – требует на порядок меньших затрат как при создании, так и при эксплуатации, нежели установка на основе реактора. При этом линейный ускоритель, являющийся одним из ключевых компонентов установки, обладает характеристиками (проектные параметры ускорителя протонов: энергия протонов до 13 МэВ, импульсный ток пучка 100 мА, длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов 100 Гц), достаточными для наработки довольно широкого ряда востребованных медицинских изотопов (таких, например, как ^{18}F , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N , ^{64}Cu , ^{123}I (на основе мишени из теллура), ^{68}Ga , ^{89}Zr и т.д.).

Для оценки пригодности ускорителя Daria для наработки медицинских изотопов произведен расчет активности радиоизотопа ^{18}F , использующегося для ПЭТ-диагностики онкологических заболеваний и мониторинга их отклика на лечение. Расчет наработанной активности произведен двумя способами: аналитически с использованием подхода, описанного в работе [1] и при помощи программного пакета Radionuclide Yield Calculator [2]. Результатом аналитического расчета стало число $3,424 \times 10^{12}$ Бк за стандартный цикл облучения, равный 2 часам, при токе пучка протонов, равном среднему току ускорителя Daria. По результатам расчета в программе Radionuclide Yield Calculator наработанная за 2 часа активность изотопа будет равна $4,137 \times 10^{12}$ Бк, с учетом рассматриваемого диапазона энергий. Такие активности являются не просто клинически значимыми, но и очень большими. Для сравнения на циклотроне СС-18/9М (ООО «ЦВТД», Москва) за 2 часа облучения при среднем токе пучка чуть меньше 60 мкА нарабатываемые активности находятся на уровне $0,22 \times 10^{12}$ Бк. Таким образом, в случае использования ускорителя Daria, будет возможно работать на меньших токах, либо же нарабатывать требуемые активности за существенно меньшее время, а также поставлять радиоактивный продукт на большие расстояния. При этом получение медицинских радиоизотопов можно будет проводить параллельно с решением основных задач, направленных на фундаментальные и прикладные исследования с использованием нейтронов.

Также следует отметить, что согласно данным МАГАТЭ по состоянию на 2020 год в Российской Федерации установлено более 50 циклотронов, пригодных для нужд ядерной медицины, что много меньше необходимого в пересчете на численность населения. При этом среди специализированных медицинских установок подавляющее большинство – зарубежного производства [3]. Как результат, регион, где будет установлен ускоритель Daria, а также соседние с ним, будут обеспечены медицинской изотопной продукцией в случае отсутствия требуемого количества медицинских циклотронов. Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать выводы о пригодности линейного ускорителя Daria для нужд ядерной медицины и целесообразности последующих исследований и разработок в данном направлении.

Список литературы

1. Koning A. ISOTOPIA-1.0 Simulation of medical isotope production with accelerators/A. Koning. – Published by Arjan Koning, 2019. – 13-18 p.
2. <https://www.aronax-nantes.fr/en/outil-telechargement/tool-radionuclide-yield-calculator/>
3. https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/lists/cyclotron%20master%20list/public_cyclotron_db_view.aspx

П.А. Федин¹, К.Е. Прянишников¹, А.В. Козлов¹, Т.В. Кулевой¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР

Имитационные эксперименты на пучке тяжелых ионов, позволяющие анализировать радиационную стойкость конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов проводятся с 2009 года в Курчатовском Комплексе Теоретической и Экспериментальной Физики (ККЭТФ). Аттестация конструкционных материалов реакторов производится в исследовательских реакторах, но процесс занимает несколько лет, а сами образцы материалов становятся активированными, что затрудняет работу с ними в анализирующих установках. Выполнение имитационных экспериментов на ускорителе позволяет за несколько суток осуществить эксперимент с контролем условий его проведения (температура образцов мишени, профиль пучка на мишени, вакуум).

P.A. FEDIN¹, K.E. PRIANISHNIKOV¹, A.V. KOZLOV¹, T.V. KULEVOY¹

¹ NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

IMITATION EXPERIMENTS ON THE HEAVY ION ACCELERATOR HIPR

Imitation experiments on heavy ion beams make it possible to analyze the radiation resistance of structural materials of nuclear and thermonuclear reactors. These experiments have been carried out since 2009 at the Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics. Certification of structural materials of reactors carried out in reactor research, but the process takes several years, and specimens themselves become radioactive activated. This makes it difficult to work with them in the analysis. The implementation of imitation experiments at the accelerator makes it possible to carry out an experiment in a few days with the control of its conditions (temperature of the target specimens, beam profile on the target, vacuum).

Конструкционные материалы ядерных и термоядерных реакторов подвергаются воздействию нейтронного потока. В следствие этого возникают явления радиационного распухания конструкционного материала [1].

В ККЭТФ с 2009 года проводятся имитационные облучательные эксперименты на пучках тяжелых ионов на ускорителе ТИПр. Ускоритель работает с длительностью импульса 330 мкс, с частотой повторения 1 Гц. Ускорение ионов до энергии 101 кэВ/нуклон достигается в структуре RFQ. В качестве ионного источника используется вакуумно-дуговой источник ионов металлов (ВДИИМ или MEVVA), что позволяет получать пучок ионов любого твердого проводящего материала. В основном облучения ведутся ионами Fe²⁺ при энергии 5,6 МэВ.

Во время облучения ведется on-line контроль за положением пучка с использованием профилометра. Также ведется контроль вакуума и температуры нагрева образцов. Три вида сборок с образцами различных форм факторов представлены на рисунке 1. Сборки с образцами во время облучения могут находиться при фиксированной температуре от комнатной до 600⁰С. Облучения могут проводиться до флюенсов, лежащих в диапазоне от 1,0·10¹² см⁻² до 2,0·10¹⁷ см⁻².

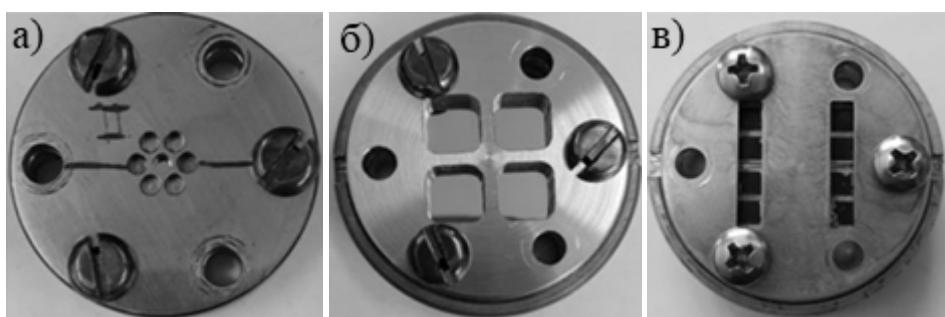


Рис. 1. Сборки с образцами: Ø3 мм (а), квадратные 10x10 мм (б), ВТСП лент (в)

Проведение имитационных экспериментов на ускорителях тяжелых ионов для проверки радиационной стойкости конструкционных материалов реакторов значительно уменьшает затрачиваемое на анализ время [2]. Доза, получаемая образцами в исследовательском реакторе за десять лет, набирается на тяжелоионном ускорителе за двое суток, при этом образцы не активируются, что позволяет использовать различные методы анализа.

Список литературы

1. Рогожкин С.В. и др. // Ядерные физика и инженеринг. Том 9, №3. 2018. С. 245-258.
2. Was G.S. // Fundamentals of Radiation Materials Science. – Springer-Verlag, Berlin, 2007. 827 p.

Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА^{1,2,3}, В.И. НИКОЛАЕВ^{1,2}, Г.Н. КРОПАЧЁВ¹, Т.В. КУЛЕВОЙ^{1,2,3}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ПРОТОНОВ ОТ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДО СИНХРОТРОНА ПРОЕКТА «ЛУЧ-ПРОТОН»

Рассмотрен проект канала МЕВТ (канал ПЭ КТП), предназначенного для перевода пучка из линейного ускорителя в протонный синхротрон с возможностью согласования фазового портрета пучка с аксептансом кольца. В канале предусматривается уменьшение энергетического разброса протонов в сгустке, а также контроль параметров ускоряемого пучка.

E.R. KHABIBULLINA^{1,2,3}, V.I. NIKOLAEV^{1,2}, G.N. KROPACHEV¹, T.V. KULEVOY^{1,2,3}

¹NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

²NRC «Kurchatov Institute» - PNPI, Gatchina, Leningradskaya Oblast, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

BEAM TRANSPORT CHANNEL FROM THE LINAC TO THE SYNCHROTRON OF THE "LUCH-PROTON" PROJECT

The project of the MEBT channel for the beam transportation from the linac to the proton synchrotron for the phase portrait matching with the ring acceptance is considered. The channel provides for protons energy spread decreasing in the bunch, as well as diagnostics of the accelerated beam parameters.

В НИЦ «Курчатовский институт» в рамках проекта Луч-Протон разрабатывается протонно-лучевой комплекс, включающий в себя линейный резонансный ускоритель импульсного типа с рабочей частотой 162.5 МГц, энергией протонов 4 МэВ и током до 25 мА, и синхротрон, обеспечивающий медленный вывод пучка протонов в диапазоне энергий 70÷250 МэВ. Канал МЕВТ должен обеспечивать транспортировку пучка от ЛУ до синхротрона с минимальными потерями, импульсный разброс частиц в пучке не должен превышать $\Delta p/p = \pm 0.4\%$ для 95% частиц.

Разрабатываемый канал состоит из:

- магнитных квадрупольных линз, обеспечивающих поперечную фокусировку пучка;
- дипольного магнита для поворота траектории в направлении синхротрона;
- дебанчера, введенного для снижения разброса частиц в пучке по импульсу;
- участка инжекции, включающего в себя септум-магнит и электростатический инфлекtor.

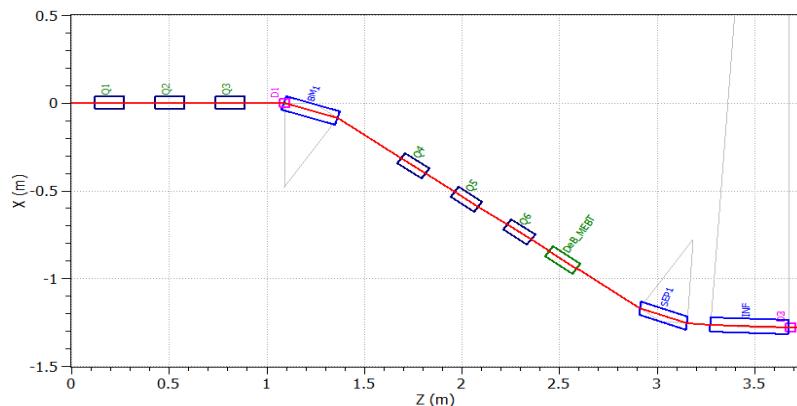


Рис. 1. Схема канала транспортировки МЕВТ (Q1-Q6 – квадрупольные линзы, BM1 – поворотный магнит, DeB – дебанчер, SEP – септум-магнит, INF – инфлекtor). Направление движения пучка слева-направо

Определена магнитооптическая структура канала. S-образная форма канала обеспечивает параллельный перенос пучка от ЛУ до синхротрона. На выходе канала дисперсионная функция $Dx = 0$. Установка в канале дебанчера позволяет снизить импульсный разброс частиц в пучке до $\Delta p/p = \pm 0.25\%$ для 95% частиц.

Н.Ф. ДРЕБЕЗОВА¹, А.В. ПРОКОПЕНКО¹, И.В. ЛУШНИКОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²АО «НПП «Магратеп», Фрязино, Московская обл., Россия

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА СВЯЗИ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МАЛОГАБАРИТНОГО МАГНЕТРОНА

В работе рассматривалась замедляющая система малогабаритного магнетрона непрерывного действия «Хина». Изучены вопросы наличия паразитных видов колебаний в замедляющих структурах и разделение их по частотам от основного вида колебаний. Изучена возможность изменения коэффициента связи замедляющей структуры с коаксиальным трактом вывода СВЧ-энергии с целью уменьшения перегрева нижнего катодного держателя и, соответственно, увеличения срока службы магнетрона. Поведены экспериментальные изменения нагруженной добротности при измененном устройстве связи.

N.F. DREBEZOVA¹, A.V. PROKOPENKO¹, I.V. LUSHNIKOV²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²Joint-stock Company 'NPP 'Magratep', Fryazino, Moscow reg., Russia

UPGRADE COUPLING DEVICE OF RETARDING SYSTEM IN SMALL-SIZED MAGNETRON

The work considered the retarding system of a small-sized continuous magnetron "Hina". The issues of parasitic types oscillations in retarding structures and their separation by frequency from the main type of vibrations are studied. The possibility of changing the coupling coefficient of magnetron retarding structure with a coaxial microwave energy output path in order to reduce overheating of the lower cathode holder and, consequently, increase the service life of the magnetron is investigated. Experimental measurements of the loaded Q factor with a modified coupling device have been carried out.

В настоящее время малогабаритные магнетроны непрерывного действия широко используются в установках по СВЧ нагреву [1]. В АО «НПП «Магратеп» разработан магнетрон Хина работающий на частоте 915 МГц с средней СВЧ мощностью 3 кВт [2]. При работе этого прибора в установках СВЧ энергетики в условиях сильно рассогласованной нагрузки срок службы данного прибора существенно сокращается, что делает нерентабельным его применение в промышленных целях. Проведенные исследования прибора показали, что причиной сокращения срока службы является преждевременное расплавление катода и элементов вывода мощности. Устранению возможных причин сокращения срока службы прибора посвящена данная работа.

С использованием пакета прикладных программ CST Studio Suite выполнялось моделирование 10-ти резонаторного анодного блока магнетрона Хина, которое показало устойчивость возбуждения основного π вида колебаний на рабочей частоте и значительное частотное отделение от других возбуждаемых видов. Проведенное моделирование устройства связи резонансной системы анодного блока с устройством вывода СВЧ-энергии из показал, что магнетрон находится в пересвязанном режиме, что создает высокие напряженности в области вывода СВЧ энергии и районе катодного держателя. Путем уменьшения площади петли связи, прикрепляемой на ламели анодного блока прибора, и увеличением отверстия в полюсе удалось уменьшить коэффициент связи резонансной системы. Проведен расчет напряженностей полей (см. рис.1) и найдены коэффициенты перенапряженности по формуле $k = E/E_{max}$. Для изначальной модели (см. рис.1а) коэффициент перенапряженности равен $k_1 = 0.93$, а значение при изменении конструкции (см. рис.1б) равно $k_2 = 0.55$.

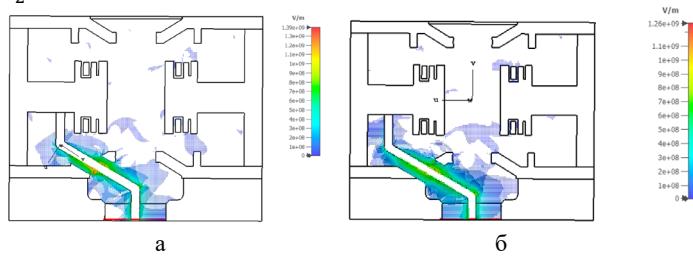


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля при оригинальном отверстии (а) и увеличенном (б).

На основе полученных результатов разработаны и переданы на производство чертежи модернизированного анодного блока. Методом измерения коэффициента отражения от частоты показано, что нагруженная добротность увеличилась в добротности в существующем и изготовленном анодном блоке увеличивается в 1.5 раза.

Список литературы

1. Морозов О.А., Каргин А.Н., Савенко Г.П., Требух В.П., Воробьев И.Б. Промышленное применение СВЧ-нагрева // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2010. 3. С. 2-6.
2. Федотов В.В. Создание малогабаритных магнетронов непрерывного действия мощностью 1-3 кВт и СВЧ камеры для кухонных СВЧ печей на частоте 915 МГц: Диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук, Фрязино, 2017. 92 с.

С.В. МАЦИЕВСКИЙ, М.В. ЛАЛАЯН, М.А. ГУСАРОВА, И.Р. КАЛИЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ПРОГРАММА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

Разработана программа расчета мощности генератора для сверхпроводящих ускоряющих резонаторов с учетом мощности потерь в стенках резонатора, нагрузки током пучка заряженных частиц и дополнительными расходами ВЧ мощности, вызванными смещениями частоты из-за микрофонного эффекта и из-за эффекта Лоренца. Программа входит в комплекс средств моделирования высокочастотных ускоряющих структур линейных ускорителей заряженных частиц и является модулем программного продукта LinacCalc [1].

S.V. MATSIEVSKIY, M.V. LALAYAN, M.A. GUSAROVA, I.R. KALIEVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

NUMERIC CODE FOR RF GENERATOR POWERING SUPERCONDUCTING ACCELERATING CAVITIES PARAMETERS ESTIMATION

Code for RF drive power calculations for SC RF cavities was developed. Algorithm takes into account RF losses in cavity, beam loading and additional power for compensation cavity detuning caused by pressure variations, microphonics, Lorentz force influence. This code is a part of LinacCalc [1] simulation code set designed as aid for high frequency systems of charged particle accelerator development.

Толщина стенок сверхпроводящих резонаторов составляет всего 2 – 4 мм, что делает резонатор восприимчивым к механическим деформациям, вызванным силой воздействия ускоряющего электромагнитного поля на стенки (сила Лоренца), колебаниями давления в окружающей гелиевой ванне и механическим вибрациям, вызванным внешними источниками механического шума (например насосами, транспортным и грузоподъемным оборудованием и т.д.). Механические деформации в свою очередь оказывают влияние на частоту резонатора. Потребляемая резонатором мощность P_f определяется выражением (1):

$$P_f = \frac{V_c^2}{\frac{4R_{sh}Q_{ext}}{Q_0}} \left\{ \left[1 + \frac{I_b R_{sh} Q_{ext}}{V_c} \cos \varphi_s \right]^2 + \left[\frac{2Q_{ext} \delta \omega_m}{\omega} \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

где V_c – напряжение на резонаторе, R_{sh} – шунтовое сопротивление резонатора; Q_0 – собственная добротность резонатора; Q_{ext} – внешняя добротность; I_b – ток пучка, φ_s – синхронная фаза, $\delta \omega_m$ – амплитуда смещения частоты, $\omega = 2\pi f$ – частота резонатора. Частота, добротность и шунтовое сопротивление резонатора определяются геометрией и свойствами материала. Рабочее напряжение на резонаторе рассчитывается исходя из требований динамики пучка.

Таким образом, даже при отсутствии значительной нагрузки пучком необходимо учитывать величину смещения частоты $\delta \omega_m$, обусловленную механическими смещениями, вызванными внешними факторами.

Разработанная программа [2] позволяет проводить оценку требуемой мощности генератора с учетом суммарного влияния смещения частоты. Программа разработана в рамках проведения работ по созданию экспериментальной секции со сверхпроводящими резонаторами (325 МГц) линейного ускорителя инжекционного комплекса проекта NICA [3-10] в рамках выполнения проекта "Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA" № FSWU-2024-0024 при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Мациевский С. В. LinacCalc [Текст] // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень. — ФИПС, М., 2018. — № 2018664631.
2. Мациевский С. В., Лалаян М.В., Гусарова М.А. Программа расчета мощности генератора для сверхпроводящих ускоряющих резонаторов [Текст] // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень. — ФИПС, М., 2024. — № 2024686051.
3. М.В. Лалаян и др., Экспериментальная секция со сверхпроводящими резонаторами (325 МГц) линейного ускорителя инжекционного комплекса проекта NICA, Письма в ЭЧАЯ, т. 22, вып. 4, 2025
4. Sukhotski et al., Electromagnetic properties of superconductive low- β 325 MHz half-wave resonators at low RF field, Supercond. Sci. Technol., 2024. DOI 10.1088/1361-6668/ad9418
5. G.V. Trubnikov, A.V. Butenko, N. Emelianov, et al., “Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron-NICA”, in Proc. IPAC’17, Copenhagen, Denmark, May 2017, paper WEPVA014, pp. 3282-3285.
6. G.V. Trubnikov, T.V. Kulevoy, S.M. Polozov et al., “New Superconducting Linac Injector Project for Nuclotron-Nica: Current Results”, in Proc. RuPAC’16, St. Petersburg, Russia, Nov. 2016, paper THPSC041, pp. 626-628.
7. S.M. Polozov et al., “Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron-NICA”, in Proc. HB’18, Daejeon, Korea, June 2018, paper TUA2WC02, pp. 83-87. doi:10.18429/JACoW-HB2018-TUA2WC02.
8. A. Butenko, E. Syresin, G. Trubnikov et al., “Status of the SC HWR cavities production for NICA project”, in Proc. of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia, paper THA01, pp. 85-88. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-THA01
9. D. Bychanok, A. Sukhotski, S. Huseu et al., «Electromagnetic properties control during prototyping, fabrication and operation of low- β 325 MHz half-wave resonators”, Journal of Physics D: Applied Physics, 54(25), 255502. doi:10.1088/1361-6463/abf168, (2021).
10. D. Bychanok, E. Gurnevich, A. Sukhotski, et al., "Quality factor characterization of superconductive low-beta 325 MHz half-wave resonators at low microwave field amplitudes", ID167, XXVIII Russian Particle Accelerator Conference, 11-15 September 2023, p.177-179.

Я.М АБАКУМОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАСЧЕТ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ БАНЧЕРОВ Б1-Б3

В докладе будет представлен краткий обзор конструкции банчера Б1 для линейного ускорителя протонов и лёгких ионов, приведена параметризованная упрощенная модель данного группирователя и основы параметризации, которые в дальнейшем будут использованы для остальных группирователей этой группы (Б2, Б3). Также для учёта смещений рабочей частоты приводится уточнённая расчётная модель, основанная на разработанной унифицированной конструкции данных группирователей.

Y.M Abakumov
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CALCULATION AND PARAMETERIZATION OF THE BUNCHERS B1-B3 DESIGN

The report will provide a brief overview of the design of the B1 buncher for a linear accelerator of protons and light ions, a parameterized simplified model of this resonator and the basics of parameterization, which will later be used for the remaining bunchers of this group (B2, B3). Also, to account for the shifts in the operating frequency, an updated calculation model is provided, based on the developed unified design of these bunchers.

С 2018 года в РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, осуществляется разработка нового ионно-синхротронного комплекса. НИЯУ МИФИ занимается созданием линейного ускорителя ЛУ1, который будет обеспечивать ускорение ионов от протонов до кислорода до энергии 7,5 МэВ на нуклон. Все резонаторы, предназначенные для ускорения и группировки, будут функционировать на единой частоте 81,25 МГц. Новый комплекс будет состоять из модуля Б1, предназначенного для предварительной группировки пучков, и второго группирователя Б2, который будет осуществлять контроль длины пучка и обрезку его хвоста. Две группы полостей будут разделены короткой транспортной линией, включающей один резервный банчер Б3 [1].

В данной работе представляется методика расчёта и параметризации банчера Б1, также подходящая для банчёров Б2 и Б3. На примере упрощенной расчетной модели показаны основные геометрические характеристики данных группирователей. Дополнительно для учёта смещений рабочей частоты, связанных с уточнённой конструктивной геометрией и испытаниями на воздухе, была разработана уточнённая параметризованная расчётная модель.

Список литературы

1. Polozov, S., Aksentyev, A., Bulgacheva et al, The Conceptual Design of the 7.5 MeV/u Light Ion Injector, in Proc. of the 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia, 2021. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB07

В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет «МФИ», Москва, Россия

ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ СВЧ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ С ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрены характеристики импульсных переключателей СВЧ мощности, предназначенных для применения в системах питания ускорителей с глубокой перестройкой энергии, используемых в томографии, радиационной терапии. Проведен анализ требований к двум типам переключателей СВЧ мощности: импульсному закорачивающему устройству, обеспечивающему вывод части ускоряющей системы из режима ускорения пучка, а также импульсному фазовращателю, обеспечивающему перевод части ускоряющей системы из режима ускорения пучка в режим торможения.

V.I. KAMINSKII, S.V. MATSIEVSKIY

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

REQUIREMENTS FOR MICROWAVE POWER SWITCH CHARACTERISTICS IN POWER SUPPLY SYSTEM OF ACCELERATOR WITH PULSED ENERGY TUNING

Characteristics of pulsed microwave power switches designed for use in power supply systems of accelerators with deep energy tune used in tomography and radiation therapy are considered. Analysis of requirements for two types of microwave power switches is carried out: pulsed short-circuiting device that ensures the withdrawal of part of accelerating system from the beam acceleration mode, as well as pulsed phase shifter that ensures transfer of part of the accelerating system from beam acceleration mode to decelerating mode.

Ускорители с глубокой перестройкой энергии находят применение в таможенном досмотре, радиационной терапии. Известны несколько методов кратной перестройки энергии от импульса к импульсу: с помощью изменения тока пучка [1], изменение условий ускорения пучка в секциях за счет вывода части ускоряющей системы из режима ускорения в режиме низкой энергии либо торможения пучка в ускоряющей системе [2]. В настоящей работе рассмотрены требования к характеристикам устройствам перестройки СВЧ мощности от импульса к импульсу, обеспечивающим отключение ускоряющей секции или перевод ее в режим торможения пучка. В первом случае отключается питание секции с помощью включения закорачивающего устройства (рис. 1), во втором импульсный фазовращатель (рис. 2) обеспечивает изменение фазы на входе ускоряющей секции на 180° . При анализе характеристик переключателей использован накопленный опыт создания антенных переключателей в радиолокационных системах [3].

В открытом состоянии переключатель должен обеспечивать передачу номинальной мощности без пробоя. В закрытом состоянии коэффициент отражения от закороченных плазмой разряда промежутков должен быть не менее 0,95 на протяжении всего СВЧ импульса.

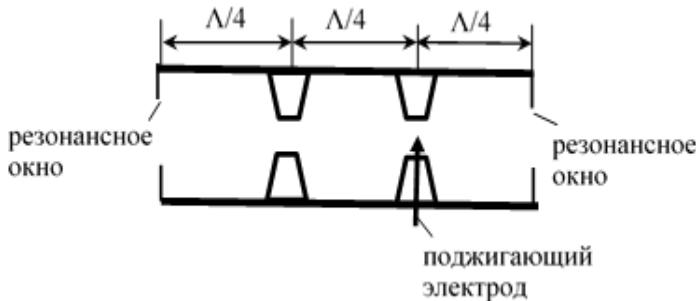


Рис. 1. Импульсное закорачивающее устройство

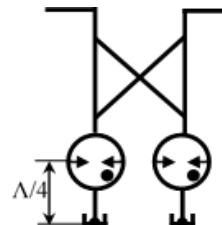


Рис. 2 Импульсный фазовращатель

Особенностью применения переключателей в системах питания ускорителей с глубокой перестройкой энергии являются требования к их фазовым характеристикам. Анализ показал, что неконтролируемое изменение фазы при переключении фазовращателя должно быть не более 5° . Это условие накладывает требование различия фаз коэффициентов отражения от разрядных промежутков не более $2,5^\circ$.

Список литературы

1. И.И. Родько, Г.А. Сарычев, П.В. Балакирев и др. Разработка комплекса лучевой терапии на основе линейного ускорителя электронов энергией 6 МэВ и конусно-лучевого компьютерного томографа // Атомная энергия, т. 125, № 5, с. 292-295, 2018
2. Characteristics analysis of the electron linear accelerator with dual energy switching and magnetron-based power supply / M.A. Gusarova, V.I. Kaminskii, M.V. Lalayan, S.V. Matsievskiy // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2024, Vol. 21, No. 6, pp. 1186–1189
3. Устройства СВЧ и антенны. под. ред. Д.И. Воскресенского // Радиотехника, М., 2006, 376 с.

С.В.КОБЕЛЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАСЧЕТ ОХЛАЖДАЮЩИХ КАНАЛОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА

Построена модель высокочастотного волноводного тракта фотоэмиссионного источника электронов, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ для источника синхротронного излучения четвертого поколения с лазером на свободных электронах «СИЛА». Проведены численное моделирование процессов нагрева и охлаждения, расчеты температурных изменений и возможных деформаций, рассмотрены варианты геометрии охлаждающих каналов и режимов подачи воды для охлаждения.

S.V. KOBELEVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CALCULATION OF COOLING CHANNELS OF A RECTANGULAR WAVEGUIDE DUCT

A model of a high-frequency waveguide duct system has been created for a photoemission electron source being developed at the National Research Nuclear University "MEPhI" for SYLA – fourth-generation SYnchrotron radiation source with a free electron LASer. Numerical simulation of heating and cooling processes, as well as calculations of temperature fluctuations and possible deformations are carried out. The options of cooling channels design and modes of water supply for cooling are considered.

Синхротрон «СИЛА» включает в себя инжектор линейного ускорителя на основе электронной пушки с термоэмиссионным катодом (для работы на накопительное кольцо) и электронной пушки с фотокатодом (для генерации пучка для лазера на свободных электронах). Форинжектор для рентгеновского лазера представляет собой классическую 3.5-ячеичную фотопушку с ускоряющей структурой на стоячей волне. В качестве источника питания планируется использовать клистрон с уровнем выходной мощности 6,5 МВт. Передача высокочастотной мощности от клистрона к фотоэмиссионной пушке будет осуществляться по волноводному тракту.

Волноводный тракт изготовлен из труб прямоугольного сечения 72 x 34 мм с толщиной стенок 5 мм. Материалом тракта является бескислородная медь. Данный волноводный тракт должен обеспечивать передачу импульсной мощности 6,5 МВт.

При передаче высокочастотной мощности из-за протекания высокочастотных токов в стенах волновода происходит нагрев, в случае высоких значений мощности возможно изменение геометрических размеров. Общее количество тепла выделяемое в волноводе определяется средней мощностью P_{cp} . При величине пиковой мощности равной 6,5 МВт в импульсном режиме значение средней мощности составляет 10,4 кВт. Стенки волновода охлаждаются за счет естественной конвекции. При построении модели для коэффициента конвективной теплоотдачи используется значение 5 Вт/м²·К. В дополнение к естественной конвекции охлаждение волновода осуществляется с помощью трубок, внутри которых проходит вода в непрерывном режиме. Температура воды, равная 293 К, является фиксированной. Произведен расчет коэффициента конвективной теплоотдачи для воды $\alpha = 691,99 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ с учетом расхода жидкости $Q = 5 \text{ л}/\text{мин}$.

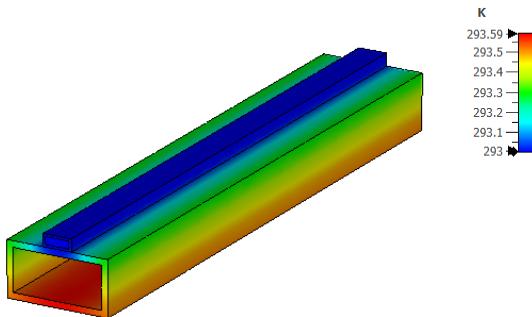


Рис. 1. Тепловое распределение в волноводе при наличии одного прямоугольного охлаждающего канала

Тепловое распределение в волноводе определяется балансом между тепловыделением, и теплоотводом, обеспечиваемым системой охлаждения. Учитывая, что средняя мощность является относительно невысокой, максимальный нагрев не превышает 1 градуса, что обеспечивает стабильность рабочих характеристик.

Список литературы

1. И. А. Ашанин, Т. В. Бондаренко, М. В. Владимиров, и др, Проект ВЧ- фотопушки для линейного ускорителя-инжектора для ЛСЭ проекта сила // Письма в ЭЧАЯ. - 2024. - №Т. 21, № 3(254). - С. 410–417.
2. Ashanin, I. A., Bondarenko, T. V., Gusarova, M. A., et al. Design and simulation of an S-band RF photogun for a linac-injector for the SYLA FEL // Journal of Instrumentation. - 2024. - №T. 19, № 10, C10004.

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ЗАДАЮЩЕГО ГЕНЕРАТОРА КЛИСТРОНА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,8 ГГц

Разработана блок-схема импульсного задающего генератора клистрона. Выполнена сборка макетов каждого усилительного модуля, входящего в состав задающего генератора, выполнена их настройка. Проведены испытания каждого модуля, а также макета импульсного задающего генератора как единого устройства.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, S.A. TUMANOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A PULSE MASTER KLYSTRON GENERATOR WITH AN OPERATING FREQUENCY OF 2.8 GHZ

A block diagram of a klystron pulse master generator has been developed. The models of each amplifier module included in the master generator have been assembled and configured. Each module was tested, as well as the layout of the pulse master generator as a single device.

Клистроны являются одними из основных СВЧ приборов, с помощью которых достаточно просто получить мощности в несколько десятков МэВ в с-диапазоне. На данный момент в НИЯУ МИФИ разрабатывается фотопушка, в составе которой будет использоваться клистрон, выдающий 6,2 МэВ на частоте $f = 2,8$ ГГц. Для запуска данного клистрона необходим импульсный задающий генератор, способный подавать импульсы длительности $\tau = 8$ мкс со скважностью $\gamma = 0,0008$ и импульсной мощностью $P = 120$ Вт.

Была разработана блок-схема задающего генератора, включающая в себя СВЧ генератор, возбуждающий СВЧ колебания с мощностью до 70 мВт, 4 усилительных модуля, после прохождения которых СВЧ мощность достигает $P = 120$ Вт, а также схемы питания и схемы управления.

Первый усилительный модуль представляет из себя сборку из 3 отечественных транзисторов ЗП618А производства «Планета-Аргалл». Это арсенидгаллиевые полевые транзисторы, имеющие широкий диапазон рабочих частот (табл. 1). Второй и третий усилительные модули строятся на согласованных транзисторах MPAL2731M30 и ILT2731M30. Каждый из данных транзисторов способен выдавать до 40 Вт импульсной мощности на частоте $f = 2,8$ ГГц. Завершающий четвертый усилительный модуль строится на базе биполярного транзистора IB2729M120. Номинальная мощность данного транзистора на частоте $f = 2,8$ ГГц составляет $P = 120$ Вт.



Рис. 1. Импульсный задающий генератор

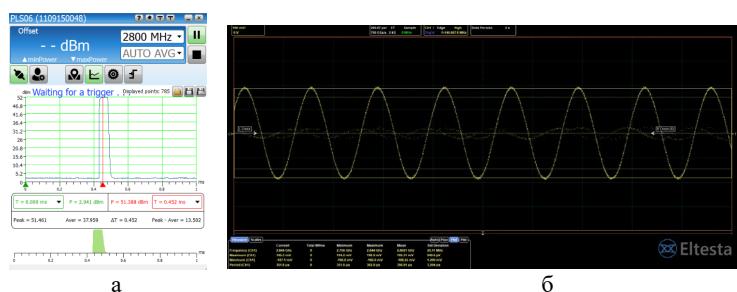


Рис. 2. Результаты измерения задающего генератора: а – значение импульсной мощности; б – форма сигнала с задающего генератора

Была произведена сборка макетов каждого усилительного модуля, входящего в состав задающего генератора, проведены их испытания и выполнена их настройка. Произведена сборка макета задающего генератора (рис. 1.). Были проведены испытания макета задающего генератора как единого устройства. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

В итоге был разработан импульсный задающий генератор, произведена сборка макетов его составных частей и макета задающего генератора. Проведены испытания макета импульсного задающего генератора и выполнена его настройка. В результате испытаний импульсная мощность составила $P = 51,3$ дБм, что соответствует 134 Вт. Форма сигнала на выходе представлена на рис. 2б.

Е.А. КУНИН, С.В. СЕРУШКИН

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПУШКА ДЛЯ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ УСТАНОВОК

Рассмотрены недостатки существующих методов предотвращения распыления катода ионами обратного распространения. Предложено конструктивное решение для активного поглощения ионов в закатодной области электронно-лучевой пушки. На основе спроектированной конструкции проведена оценка основных параметров устройства методами численного моделирования.

E.A. KUNIN, S.V. SERUSHKIN

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

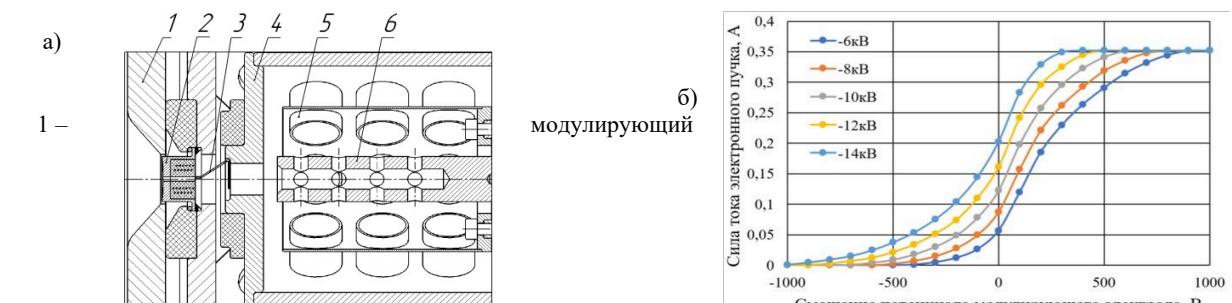
ELECTRON GUN FOR HIGH VACUUM SYSTEMS

The disadvantages of the existing methods for preventing cathode sputtering by backscattered ions have been analyzed. A design solution has been proposed to actively absorb ions in the post-cathode region of the electron beam gun. Using the designed structure, the key parameters of the device have been assessed through numerical simulation techniques.

В настоящее время, электронные пушки являются неотъемлемой частью установок для реализации множества технологических процессов. Некоторые из них, например, генерация рентгеновского излучения в медицинских установках, требуют условий высокого вакуума в области прохождения электронного пучка. Основное условие эксплуатации технологического оборудования в составе высоковакуумных установок заключается в малом натекании стороннего газа в рабочую область через конструкцию устройства. Для борьбы с натеканием атмосферного воздуха и предотвращения образования мнимых течей часть соединений в электронной пушке выполняется неразборными (сварка, пайка металлы-керамика). Однако, при прохождении электронного пучка через газовую среду, происходит ее ионизация. Образующиеся ионы накапливаются в канале пучка и ускоряются в направлении катода, распыляя его поверхность, что значительно снижает ресурс и негативно влияет на остаточное давление.

Существующие методы борьбы с таким эффектом заключаются в изготовлении катодов с осевым отверстием и расположением в закатодном пространстве ионного уловителя – детали, которая воспринимает основной ионный поток и предотвращает распыление материала в рабочую область. Тем не менее, при длительной эксплуатации, в закатодном пространстве может накапливаться значительное количество распыленного материала, проникающего в область распространения пучка и осаждаемого на поверхности керамических изоляторов, что увеличивает вероятность поверхностного пробоя.

В работе предложено конструктивное решение для снижения остаточного давления и увеличения ресурса непрерывной работы электронно-лучевой пушки в составе высоковакуумных установок (рис. 1), заключающееся в добавлении в конструкцию электродной группы из ячеичного анода и двух катодов – внешнего и внутреннего.



(фокусирующий) электрод, 2 – термокатод, 3 – спираль косвенного накала, 4 – внешний катод ионногеттерной откачки, 5 – ячеечный анод ионногеттерного откачного узла, 6 – внутренний катод ионногеттерного откачного узла

Рис. 1. Электронно-лучевая пушка с активным поглощением обратных ионов и остаточного газа: а) основные элементы, б) вольт-амперная характеристика пушки

Описанная конструкция функционирует аналогично ионно-геттерному насосу [1]: ионы обратного движения распыляют геттерный материал внутреннего катода ионно-геттерного откачного узла, нейтрализуются и после достижения некоторого давления в его рабочей области – становится возможным инициирование тлеющего разряда. Горение разряда поддерживает стабильную откачуку образовавшихся атомов (нейтрализованных ионов), в соответствии с механизмами откачки различных химических элементов [2].

Список литературы

1. Саксаганский Г.Л., Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с. – ISBN 5-283-03913-7.
2. Васильев Г.А., Магниторазрядные насосы. М.: Энергия, 1970. – 112 с.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНЫХ КВАДРУПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Проведён сравнительный анализ характеристик различных конфигураций компактных квадрупольей на основе постоянных магнитов PMQ для применения в компактных линейных ускорителях протонов (ЛУП) прикладного назначения. В широком диапазоне размеров элементов исследованы конфигурации классических опций (КО), с различным количеством M сегментов из постоянных магнитов (ПМ), так и гибридных опций (ГО) с полюсами из ферромагнетика (ФМ).

L.Y. OVCHINNIKOVA, V.V. PARAMONOV
Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF COMPACT QUADRUPOLES BASED ON PERMANENT MAGNETS

A comparative analysis of the characteristics of various configurations of compact quadrupoles based on permanent magnets for use in compact linear proton accelerators (LPA) for applied purposes was carried out. Configurations of classical variants (CV), with different numbers of M segments made of permanent magnets (PM), and hybrid variants (HV) with ferromagnetic (FM) poles were investigated in a wide range of element sizes.

Разработанные на основе ПМ квадруполи, [1, 2], нашли широкое применение в ускорителях заряженных частиц. Они являются единственным решением для фокусировки в компактном линейном ускорителе протонов для терапии. Используя современные средства численного решения 3D задачи нелинейной магнитостатики, в широком диапазоне изменения размеров элементов исследованы характеристики конфигураций, показанных на рис. 1.

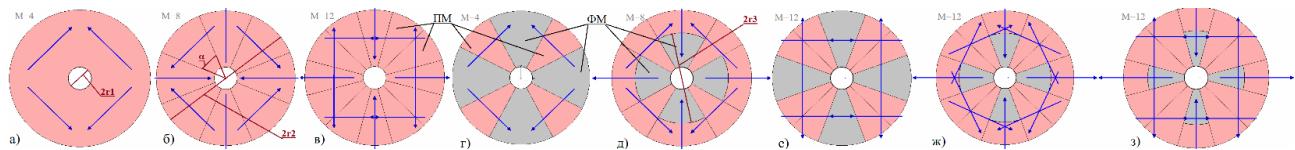


Рис. 1. Конфигурации PMQ для которых проведен анализ характеристики.

Для всех рассмотренных вариантов выполняется основная зависимость, [1, 2], величины фокусирующего градиента $G \sim \text{const}(\alpha, r_3/r_1) B_r/r_1(1 - r_1/r_2)$. Для КО, рис. 1а-в, в работе [3] даны, в 2D приближении, аналитические выражения для величин основных параметров, в целом совпадающие с результатами 3D моделирования. Введение полюсов ФМ, ГО на рис. 1г-з, концентрирует распределение индукции B в апертуре и существенно (при $M = 4, 8$ в разы) повышает, по сравнению с аналогичными КО, величину реализуемого G . При малых величинах $r_1 \sim 2$ мм в ГО G достигает величины до 1000 Т/м и более, см. рис. 2а. Для каждой ГО существует зависимость угла раскрытия сегмента ПМ $\alpha_1(M, r_2/r_1, r_3/r_1, dl)$ для получения G_{\max} . При высоких значениях G торцы полюсов ФМ находятся в режиме насыщения. В приграничных областях величин α возрастает уровень мультипольных добавок в распределении индукции B , см. рис. 2б. Но всегда в ГО существует вторая зависимость $\alpha_2(M, r_2/r_1, r_3/r_1, dl)$, обеспечивающая $a_5 = 0$ и близкая к $\alpha_1(M, r_2/r_1, r_3/r_1, dl)$. Поэтому всегда можно найти компромиссное решение ГО.

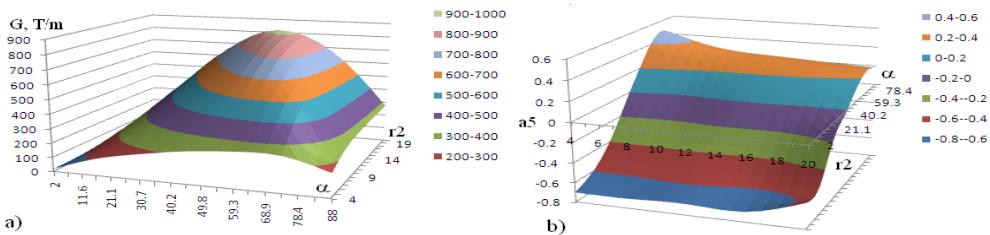


Рис. 2. Поверхности уровня $G(\alpha, r_2)$ - (а) и $a_5(\alpha, r_2)$ - (б) при $r_1 = 2$ мм, $dl = 40$ мм для конфигурации на рис. 1г.

Результаты исследования позволяют выбрать оптимальный вариант для разработки фокусирующего элемента, удовлетворяющий как необходимым физическим требованиям, так и условиям технологической реализуемости.

Список литературы

1. N.V. Lazarev, V.S. Skachkov, "Tipless Quadrupole Lenses", Proc. 1979 Linac Conference, p. 380, 1979
2. K. Halbach, "Strong Rare Earth Cobalt Quadrupoles", Proc. 1979 PAC, IEEE, vol. NS-26, no. 3, p. 3882, 1979
3. K. Halbach, "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material", NIM A, vol. 169, 1980

Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ,
Т.В. КУЛЕВОЙ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОКА ЛАБОРАТОРНОГО ИСТОЧНИКА ЛЕГКИХ ИОНОВ С РЕЗОНАНСНОЙ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРОЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЕ

В Курчатовском комплексе теоретической и экспериментальной физики НИЦ “Курчатовский институт” для решения задач экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов создается инжекционный комплекс на базе нескольких ионных источников. Тяжелые (Fe) и легкие (H₂/He) ионные пучки будут облучать мишень в одной и той же камере одновременно. Для генерации пучков легких ионов разрабатывается и исследуется компактный СВЧ ионный источник. В статье рассмотрены возможности повышения тока лабораторного источника легких ионов с резонансной разрядной камерой для установки на высоковольтной платформе.

D. N. SELEZNEV, A.B. ZARUBIN, N.N. VINOGRADSKI, K.E. PRYANISHNIKOV,
T.V. KULEVOY
National Research Center "Kurchatov Institute"

LABORATORY SOURCE OF LIGHT IONS WITH A DISCHARGE CHAMBER BASED ON A BELOW-CUTOFF WAVEGUIDE FOR FACILITY ON A HIGH-VOLTAGE PLATFORM

An injection complex based on several ion sources is being created at the Kurchatov Institute for Theoretical and Experimental Physics of the Kurchatov Institute Research Center to solve the problems of rapid analysis of radiation resistance of structural materials of nuclear and thermonuclear reactors. Heavy (Fe) and light (H₂/He) ion beams will irradiate the target in the same chamber simultaneously [1]. A compact microwave ion source is being developed and investigated for the generation of light ion beams. The article discusses the possibilities of increasing the current of a laboratory light ion source with a resonant discharge chamber for installation on a high-voltage platform.

В Курчатовском комплексе теоретической и экспериментальной физики НИЦ “Курчатовский институт” для решения задач экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов создается инжекционный комплекс на базе нескольких ионных источников. Тяжелые (Fe) и легкие (H₂/He) ионные пучки будут облучать мишень в одной и той же камере одновременно [1]. Для генерации пучков легких ионов разрабатывается, и исследуется компактный СВЧ ионный источник. В статье рассмотрены возможности повышения тока лабораторного источника легких ионов с резонансной разрядной камерой для установки на высоковольтной платформе. Структурная схема лабораторного источника ионов представлена на рисунке 1.

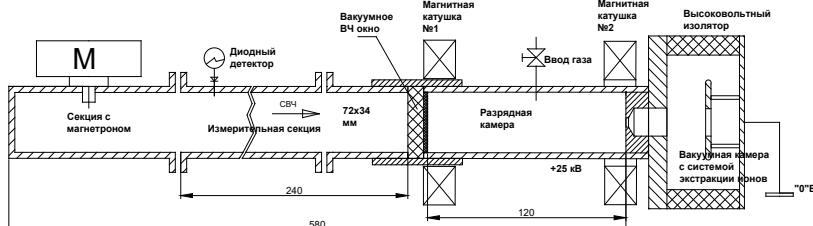


Рис. 1. Схема лабораторного источника ионов.

Основные параметры ионного источника представлены в [2]. Измерена зависимость тока пучка ионов гелия от СВЧ мощности, поступающей в плазму разряда при давлении в разрядной камере $p=2 \times 10^{-6}$ Торр.

Список литературы

1. Fedin P. A. et al. REQUIREMENTS FOR THE DUAL Fe+ H/He BEAM AT THE ACCELERATOR HIPR FOR SIMULATION OF NEUTRON INFLUENCE ON NUCLEAR REACTOR MATERIALS //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – T. 1686. – №. 1. – С. 012073
2. Лабораторный ЭЦР-источник легких ионов с резонансной разрядной камерой для установки на высоковольтной платформе / Д. Н. Селезнев, А. Б. Зарубин, Н. Н. Виноградский [и др.] // Ядерная физика и инжениринг. – 2024. – Т. 15, № 4. – С. 372-375. – DOI 10.56304/S2079562923030302.

А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

В каналах транспортировки должны обеспечиваться условия прохождения ионных пучков с минимальными потерями. Ионы разного типа и зарядностей отличаются по взаимодействию с разреженной газовой средой. Целью моделирования вакуумной системы каналов транспортировки является выбор конфигурации и параметров вакуумных насосов для получения требуемых вакуумных условий.

A.S. PANISHEV, S.M. POLOZOV, V.L. SHATOKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

PUMPING PROCESS SIMULATION FOR BEAM TRANSPORT LINES OF A LINEAR ACCELERATOR

The ion beams transport conditions with minimal losses must be ensured in the transport channels. Ions of different types and charges differ in their interaction with a rarefied gaseous. The vacuum system of transport lines was modeled to select the configuration and parameters of vacuum pumps to obtain the required vacuum conditions.

Каналы транспортировки в структуре линейного ускорителя протонов и легких ионов [1] предназначены для обеспечения прохождения пучков между ускоряющими секциями и согласования между ними, а также диагностики параметров пучков. Ускоренные частицы испытывают столкновения в среде остаточного газа, что приводит к потерям за счет процессов рассеяния и перезарядки ионов. Для ограничения потерь ионов в тракте при взаимодействии с остаточным газом требуется давление остаточного газа не хуже 10^{-5} Па. Задача моделирования состоит в оптимизации параметров вакуумной системы ускорителя. Вакуумные условия в каналах транспортировки рассчитывались в программе Molflow+ [2]. Тепловая десорбция со стенок вакуумных камер бралась на уровне 10^{-9} (мбар·л)/(с·см²), принятом для проектного расчета вакуумной системы.

Канал транспортировки пучка ионов низкой энергии (LEBT) предназначается для обеспечения сведения пучков ионов от нескольких источников ионов (ИИ) и транспортировки до первой ускоряющей структуры. Получаемое распределение давления вдоль тракта зависит от величины входящего газового потока и эффективности откачки вакуумными насосами, моделей насосов. Рассматриваемая конструкция канала предполагает расстановку вдоль тракта до 10 турбомолекулярных насосов (ТМН) производительностью по 700 л/с для N₂. Расчетное давление остаточного газа от тепловой десорбции поверхностей получается на требуемом уровне 10^{-5} Па. В таких условиях потери многозарядных ионов из лазерного источника в тракте составят допустимые единицы процентов. Другим видом газовой нагрузки является поток нейтрального рабочего газа из ИИ на электрон-циклотронном резонансе (ЭЦР), водород или гелий. Нагрузка этим потоком принималась равной $2,6 \cdot 10^{-2}$ мбар·л/с, что по величине соответствует максимальному расчетному току ионов из источника, в данном случае это предельная оценка возможного потока от ИИ. Давление газа будет снижаться от выхода ЭЦР по мере прохождения газового потока вдоль тракта LEBT при его откачке работающими насосами. На начальном участке тракта давление максимально, на уровне 10^{-3} Па, в камере экстракции ЭЦР, и падает до уровня 10^{-4} Па в камере дипольного магнита сведения пучков. В таком случае потери пучка ионов на этом начальном участке тракта составят единицы процентов. Для снижения интенсивности потерь на этом участке тракта предложено усилить входной блок откачки за ЭЦР, установив спаренные ТМН.

Каналы транспортировки средней энергии МЕВТ служат для перемещения ионного пучка между группами ИН резонаторов. Они состоят из каналов круглого сечения, оборудованных системами диагностики пучка и резонаторами-группирователями. В связи с ограниченной проводимостью внутренних выходных каналов группирователей наблюдается несколько повышенная величина давления на участках трактов без дополнительных насосов. В связи с невозможностью локальной установки дополнительных насосов рекомендуется применять расширенные процедуры обезгаживания вакуумных элементов трактов.

Канал транспортировки высокой энергии НЕВТ служит для транспортировки ускоренного пучка в канал инъекции в синхротрон. Основными средствами откачки являются магниторазрядные насосы НМД. Оптимизированы частота расстановки насосов вдоль тракта и их параметры для обеспечения требуемой величины вакуума. Рассмотрена возможность дополнительного снижения давления в конце тракта за счет узла дифференциальной откачки и большей степени обезгаживания деталей вакуумпроводов.

Список литературы

1. Polozov, S.M., Panishev, A.S., Shatokhin, V.L. (2021). Optimization of accelerators vacuum structures pumping. 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPS10.
2. Molflow+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/<https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>.

С.М. ПОЛОЗОВ, М.А. СОЛОМАТИН, В.Л. ШАТОХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРИИ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Кафедра Электрофизических установок НИЯУ МИФИ модернизировала учебно-исследовательскую лабораторию "Вакуумная техника". Лаборатория оснащена современными вакуумными системами и устройствами автоматизации. Главная цель — обеспечить практическое освоение студентами работы с вакуумными системами, важными компонентами электрофизических установок.

S.M. POLOZOV, M.A. SOLOMATIN, V.L. SHATOKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

AUTOMATIZATION OF THE VACUUM TECHNOLOGY LABORATORY

The educational and research Laboratory "Vacuum Technology" has been modernized at the Department of Electrophysical Facilities at National Research Nuclear University MEPhI. The Laboratory is equipped with modern vacuum systems and automation devices. The main goal is to provide practical students training in operation with vacuum systems, important components of electrophysical facilities.

Лабораторный практикум по вакуумной технике предоставляет студентам возможности для практического обучения работе с вакуумным оборудованием. За время выполнения работ на предыдущих этапах программы модернизации лаборатории вакуумной техники были разработаны и созданы лабораторные практикумы по целому ряду тематик: исследование режимов откачки вакуумной системы; измерение вакуума и газовых потоков; исследование состава остаточного газа; изучение техники течеискания. На данном этапе выполнялись работы по автоматизации вакуумного оборудования лаборатории и постановке новой лабораторной работы по автоматизированному управлению откачкой сверхвысоковакуумной установки.

Современные вакуумные стенды лаборатории позволяют студентам получить базовые навыки в автоматизированном управлении вакуумными процессами. Система автоматизации выполняет следующие задачи:

- Сбор данных о вакуумной среде с преобразователей, отображение и передача данных в головной программируемый логический контроллер (ПЛК) для отображения на панели человека-машинного интерфейса (HMI-панель).

- Светозвуковая сигнализация в случае падения давления ниже необходимого уровня.
- Отображение информации о вакуумной среде на локальном HMI контроллере.
- Выдача разрешения на откачку и запуск насосов с использованием контакторов.
- Также реализована возможность подключения к компьютеру через локальную сеть автоматики для дополнительного вывода информации и управления с компьютера с помощью ОРС сервера и бесплатно распространяемых SCADA систем, включенных в реестр российского программного обеспечения.

Для каждой лабораторной работы предусмотрена установка специализированного блока автоматики. В нем располагается локальный контроллер, который отвечает за мониторинг и обработку всех поступающих сигналов. На основе этих данных контроллер выдает разрешения на запуск необходимых операций. Встроенная HMI-панель предоставляет возможность отображать актуальные данные и состояние процессов. Для обеспечения дополнительного уровня информированности, в каждый блок автоматики интегрирована свето-звуковая сигнализация.

Кроме того, в системе автоматизации предусмотрен общий пульт для преподавателя, в котором установлен головной контроллер более высокого уровня ПЛК. Этот контроллер отслеживает все локальные точки автоматизации вакуумной лаборатории, выступая в роли второго уровня контроля. Пульт преподавателя предоставляет возможность удаленного управления всеми локальными блоками автоматики. Вся система управления и информирования преподавателя реализована через HMI-панель, находящуюся на посту преподавателя. Эта панель функционирует как интерфейс оператора, визуализируя все необходимые данные и позволяя управлять системой с помощью интуитивно понятного интерфейса.

В новой лабораторной работе «Автоматизация процесса откачки высоковакуумной установки» предусмотрены два ключевых этапа, обеспечивающих практическое изучение вакуумной техники. Первый этап предполагает использование модели вакуумной системы, включающей дополнительный контроллер и индикаторы, которые посредством световой индикации демонстрируют работу насосов. Задатчики аналоговых сигналов в системе симулируют данные от вакуумных датчиков, что способствует безопасному предварительному тестированию, позволяя достичь нужных уровней вакуума и обеспечить правильную последовательность включения насосов. Второй этап посвящен работе с реальным стендом, который оборудован тремя насосами, включая сверхвысоковакуумный, вакуумметрами и клапанами, что позволяет учащимся взаимодействовать с полноценной вакуумной системой, применяемой в электрофизических установках.

Подготовленное описание работ включает теоретическую часть, схемы стендов с характеристиками приборов, рекомендации по выполнению и справочные материалы, направленные на развитие навыков управления работой вакуумного оборудования и автоматизации вакуумных процессов.

А.А. ИСАЕВ¹, Р.П. ПЛЕШАКОВА², А.Е. ШИКАНОВ²

¹МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ТРУБКИ (ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ)

Приводится обзор развития и современного состояния работ по созданию ускорительных газонаполненных нейтронных трубок в России и за рубежом. Рассмотрены физические принципы работы трубок, использующих в качестве источников ионов тяжелого водорода разряд Пеннинга, разряд с полым катодом, высокочастотный и СВЧ-разряды, а также разрядные системы с прозрачным анодом. Обсуждаются возможности и перспективы их применения в ядерной геофизике, элементном анализе вещества, медицине, системах поиска и идентификации скрытых опасных веществ и предметов.

A.A. ISAEV¹, R.P. PLESCHAKOVA², A.E. SHIKANOV²

¹MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

GAS-FILLED NEUTRON TUBES (EXPERIENCE OF CREATION AND APPLICATION)

The article provides an overview of the development and current state of work on the creation of accelerating gas-filled neutron tubes in Russia and abroad. The article examines the physical principles of operation of tubes using the Penning discharge, hollow cathode discharge, high-frequency and microwave discharges, as well as discharge systems with a transparent anode as sources of heavy hydrogen ions. The possibilities and prospects for their application in nuclear geophysics, elemental analysis of matter, medicine, systems for searching for and identifying hidden hazardous substances and objects are discussed.

Д.Л. ЛОГВИНОВ, Д.А.ЛЯКИН, Е.Д. ЦЫПЛАКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОЕКТА «ЛУЧ-ПРОТОН»

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» осуществляется проект «Луч-Протон» для создания центра протонно-лучевой терапии. В рамках этого проекта в НИЦ «Курчатовский институт» - ККТЭФ в качестве инжектора в протонный синхротрон разрабатывается импульсный протонный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) с энергией 5 МэВ, рабочей частотой 162.5 МГц и током 30 мА. Для полноценного функционирования установки необходимо знать параметры пучка ускорителя. В работе представлен проект проволочного профилометра для протонного ускорителя.

D.L. LOGVINOV, D.A. LIAKIN, E.D. TSYPLAKOV, AV. KOZLOV, T.V. KULEVOY
National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A DETECTOR FOR A PROTON ACCELERATOR FOR THE BEAM-PROTON PROJECT

Currently, «Kurchatov institute» is running the project «Beam-Proton» to create a center of protonorotnoye therapy. Within the framework of this project in «Kurchatov institute» - KKTEP as an injector in proton synchrotron is developed a proton pulse accelerator with a spatio-uniform quadrupole focusing (RFQ) with energy 5 MeV, working frequency 162.5 MHz and current 30 mA. The accelerator beam parameters are required for proper operation of the installation. (RFQ) with an energy of 5 meV, a working frequency of 162.5 MHz and a current of 30 mA. The project of a wire profilometer for proton accelerator is presented.

Проект «Луч-Протон» направлен на создание нового протонного синхротрона для протонно-лучевой терапии. Для корректной работы ускорителя и его настройки требуется знать параметры пучка. Для контроля пучка требуется разработать проволочный профилометр, который позволит контролировать пучок в ускорителе [1]. В работе представлена на обсуждение конструкция полномасштабного макета проволочного профилометра (рис.1). Конструкция представляет собой детектор, переходную катушку и линейный привод, который обеспечит ход конструкции на 250мм. Детектор состоит из основы №5, двух защитных рамок №6 и набора держателей ламелей №7. Основа представляет из себя металлическую П-образную деталь, выполненную из стали, служащую для крепления ламелей с одной стороны и штока с другой. Защитный рамки защищают держатели от попадания прямых лучей пучка, выполнены из нержавеющей стали. В конструкцию входит три держателя ламелей, выполненных из керамики, которые служат для крепления детекторной сетки в горизонтальном, вертикальном и под углом 45 градусов положениях соответственно. Используется 16-20 проводов (тонких лент) на каждую из плоскостей, диаметром 0,8 мм и шагом в 1 мм. Каждый провод подключен кциальному каналу, и сигнал, производимый каждым из них, пропорционален количеству частиц, достигающих провода. Считывание тока в каждом проводе позволяет нам реконструировать поперечный профиль пучка. Переходная катушка №4 обеспечит необходимый ход, в положении 1 детектор будет полностью находиться в катушке №4, в положении 2 детектор находится по середине мишенной камеры и готов к работе.

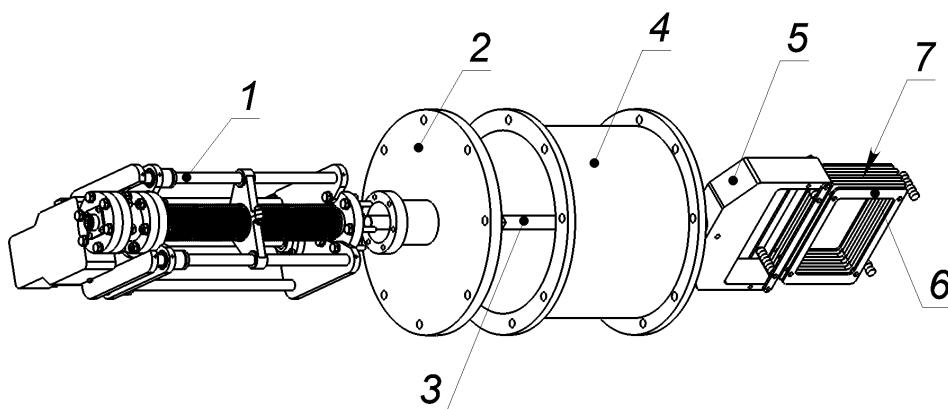


Рис. 1. Конструкция проволочного профилометра (1-линейный привод, 2-переходной фланец, 3-шток, 4-переходная катушка, 5-основа профилометра, 6-защитная рамка, 7-набор держателей ламелей)

Список литературы

1. Araceli Navarro Fernandez // Characterization and optimization of CERN Secondary Emission Monitors (SEM) used for beam diagnostics., 2017, p.13-19

Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, Т.А. ЛОЗЕЕВА, Г.Б. ШАРКОВ, А.А. МОРОЗОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ НА БАЗЕ НИЯУ «МИФИ» СУММАТОРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Представлены результаты разработки и измерений набора сумматоров высокой высокочастотной мощности, входящих в состав твердотельных усилителей (ТТУ) для питания резонаторов ускорителей заряженных частиц. Рассмотрены примеры устройств, способных работать в VHF и UHF диапазонах частот с мощностями до сотен кВт в импульсном и непрерывном режимах. Различные принципы объединения мощности (вместе с возможностями электронных компонент) позволяют создать широкую линейку надежных твердотельных усилителей для питания ускорителей ионов и кольцевых ускорителей электронов.

Y.Y. LOZEEV, T.A. LOZEEVA, G.B. SHARKOV, A.A. MOROZOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

R&D AND MANUFACTURING OF RF POWER COMBINERS FOR SOLID-STATE AMPLIFIERS BASED ON NRNU “МЕФИ”

The results of solid-state amplifier RF power combiners R&D and measurements are presented in this paper. These solid-state amplifiers are often used to power the cavities of particle accelerators. The combining devices capable of working in VHF and UHF bands with up to hundreds kW output power in CW and pulsed modes, using various combining techniques together with the capabilities of electronic components allow for the wide and reliable assortment of SSAs for ion linac and electron rings power.

В последние годы все больше ускорительных комплексов переходят на системы питания резонаторов на основе твердотельных усилителей [1-3]. Такие системы обладают высокой надежностью, ремонтопригодностью и хорошим качеством выходного сигнала. Достигается высокая надежность ТТУ прежде всего за счет модульности – усилитель состоит из некоторого количества независимых взаимозаменяемых усилительных ячеек. В такой структуре ТТУ одним из важных элементов является система суммирования мощности с усилительных ячеек. Суммирование при работе с большими уровнями мощности происходит в элементах ВЧ-трактов – волноводах и резонаторах. В данной статье представлены сумматоры мощности на основе коаксиального волновода прямоугольного сечения и сумматор на основе прямоугольного волновода.

Линейка сумматоров на рабочей частоте 81,25 МГц на основе коаксиальных волноводов прямоугольного сечения позволяет работать с уровнями мощности до 200 кВт в импульсном режиме при двух возможных архитектурах ТТУ. Компактный и удобный форм фактор дает разместить сумматоры непосредственно в усилительной стойке. Данная линейка сумматоров предназначена для питания резонаторов линейного ускорителя ионов.

Сумматор на основе прямоугольного волновода с возбуждающими антеннами предназначен для работы с уровнем мощности 500 кВт в непрерывном режиме на частоте 500 МГц. Сумматор имеет 16 входов, каждый из которых переносит около 32 кВт непрерывной мощности, антенны оснащены системой охлаждения. Такой сумматор может являться финальной ступенью объединения мощности в ТТУ для питания резонаторов колец электрон-позитронных коллайдеров, источников синхротронного излучения и т.д. Для отработки технологий производства такого сумматора был разработан, изготовлен, настроен и измерен макет сумматора на основе прямоугольного волновода на 4 входа. После настройки результаты измерений с высокой степенью точности соответствуют расчетным характеристикам макета. Сумматор 4-1 спроектирован и изготовлен силами центра проектирования и прототипирования НИЯУ «МИФИ».

Разработка, проектирование и изготовление линейки сумматоров мощности с различными характеристиками позволило наработать компетенции в области создания твердотельных усилителей.

Список литературы

1. J. Jacob, J.-M. Mercier, M. Langlois, G. Gautier // Proc. of IPAC2011, San Sebastian, Spain, P. 71-73
- 2.. A.D. Yeremian, C. Adolphsen, J. Chan, G. DeContreras, K. Fant and C. Nantista // Proc. of SRF2015, Whistler, BC, Canada, P. 562-565
3. D. Horan, D. Bromberk, N. P. DiMonte, A. Goel, T. Madden, A. Nassiri, G. Trento, G. J. Waldschmidt // Proc. of IPAC2021, Campinas, SP, Brazil, P. 2335-2338

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, О.А. ИВАНОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ДЛИННОФОКУСНОЙ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ И ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ЭЦР ИСТОЧНИКА

Разработана длиннофокусная система экстракции и формирования пучка протонов с возможностью продольного перемещения системы электродов относительно плазменного электрода для ЭЦР источника с рабочей частотой 2,46 ГГц. Выполнено моделирование динамики пучков протонов в источнике.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, O.A. IVANOV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A LONG-FOCUS SYSTEM FOR EXTRACTION AND BEAM FORMATION OF AN ECR SOURCE

The article presents the results of the developed design of the ECR source and the obtained values of numerical simulation of the beam extraction system. The dynamics of proton beams in the source was modeled.

В работе представлены результаты численного моделирования системы экстракции и фокусировки пучка для системы с общей длиной более 700 мм с учетом магнитной системы источника и изоляторов. Фокусировка в конструкции производилась с помощью ускоряющей электростатической линзы, так как система с тормозящей линзой показывает худшие результаты по сравнению с результатами ускоряющей. Выполнено моделирование системы экстракции пучка на основе пирсовской системы электродов. Данная система основана на оптике Пирса, который предложил компенсировать пространственный заряд электрическим полем соответствующим образом выбранных электродов. В первую очередь необходимо определить конструкцию электродов, позволяющих получить сходящийся пучок. На выходе из системы диаметр пучка должен быть менее 10 мм, эмиттанс менее 0,003 мм·рад. Схема расчетных моделей и траектории частиц представлены ниже.

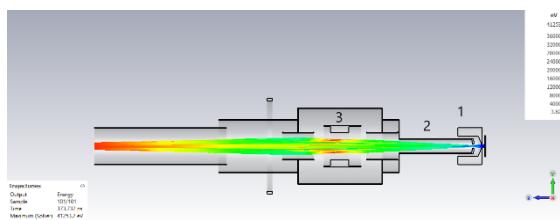


Рис.1. Схема расчетной модели экстрактора и траектория протонов:
1 – плазменный электрод, 2 – извлекающий электрод, 3 – блок
электродов электростатической линзы с несимметричным
центральным электродом.

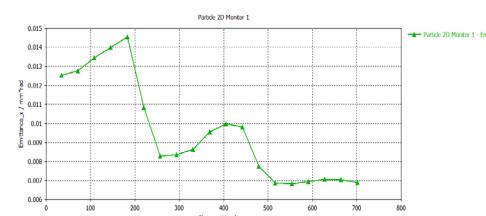


Рис.2. Зависимость среднеквадратичного поперечного
эмиттанса от координаты в системе извлечения для
протонов при использовании ускоряющей
несимметричной линзы

При проведении моделирования были получены следующие значения: эмиттанс - 0,007 мм·рад, диаметр пучка – 16 мм. Предполагается дальнейшая оптимизация конструкции для улучшения параметров диаметра пучка.

Список литературы

1. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В.// VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021». Сборник научных трудов. Москва, 23–26 марта 2021 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 388- 389.
2. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В. Иванов О.А., Краснов А.С// VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2022». Сборник научных трудов. Москва, 22–25 марта 2022 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. С. 324.

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, А.С. КРАСНОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ЦИЛИНДРОВ ФАРАДЕЯ ИЗ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА ЭНЕРГИЮ 7МэВ И 5кэВ

Разработана модель цилиндра Фарадея для электронных пучков на энергию 7МэВ и 5 кэВ и выполнен ее расчет. Построены функции отношения количества вторичных электронов, испускаемых при бомбардировке системы, к первичным (падающим) от энергии падающих частиц. Выполнено моделирование траекторий электронов в медном и алюминиевом цилиндрах Фарадея.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, A.S. KRASNOV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF ALUMINUM AND COPPER FARADAY CYLINDERS FOR ELECTRON BEAMS WITH ENERGIES OF 7 MeV AND 5 keV

A Faraday cylinder model for electron beams with energies of 7 MeV and 5 keV has been developed and calculated. The functions of the ratio of the number of secondary electrons emitted during the bombardment of the system to the primary (incident) from the energy of the incident particles are constructed. The electron trajectories in a copper and aluminum Faraday cylinder are simulated.

Одним из наиболее простых и надежных устройств для определения электрического заряда и интенсивности пучка является цилиндр Фарадея.

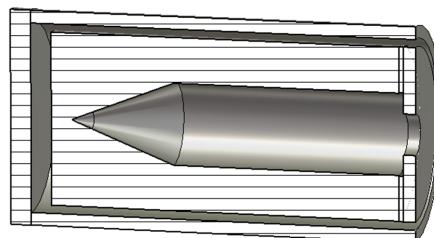


Рис. 1. Схема упрощенной модели ЦФ.

Для определения характеристик электронных пучков с энергией 7МэВ и 5 кэВ была разработана модель цилиндра Фарадея, представленная на рис.1. Проведено моделирование траекторий электронов для энергий 7МэВ и 5 кэВ в медном и алюминиевом цилиндрах Фарадея. Параметры пучка, для которых производился расчет представлены в таблице 1.

Табл. 1. Параметры электронного пучка в моделях на 7 МэВ и 5кэВ.

Параметр	Значения для 7 МэВ	Значения для 5кэВ
Энергия первичных электронов, кэВ	7000	5
Ток пучка, мА	0,006	20
Диаметр пучка, мм	4	4

Результаты моделирования представлены на рис.2. Для более наглядного сравнения потенциал запирающего электрода был выбран равным нулю. Из рисунков с траекториями видно, что при высоких энергиях и небольших токах медный цилиндр с конусным вырезом не позволяет выходить вторичным электронам в отличии от алюминиевого. При низких энергиях и больших токах наоборот алюминиевый цилиндр лучше «сдерживает» вторичные электроны.

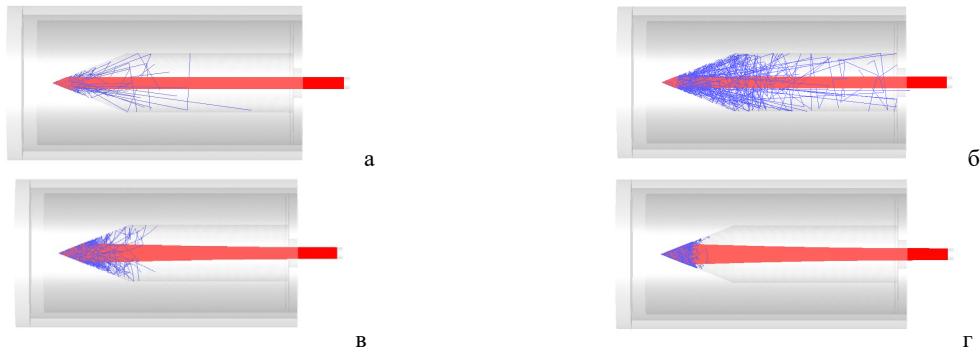


Рис. 2. Траектории электронов в цилиндре Фарадея: а - 7МэВ в медном; б - 7МэВ в алюминиевом; в - 5кэВ в медном; г - 5кэВ в алюминиевом.

А.А. МАЛЫШЕВ, Е.Д. ЦЫПЛАКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Н.В. МАРКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ МЕДИЦИНСКОГО УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ЛУЧ-ПРОТОН»

В представленной работе приведены результаты численного моделирования тёплых дипольных магнитов, проводимого в специализированной среде для электромагнитных расчётов на основе численных методов, для различных каналов транспортировки протонного медицинского комплекса лучевой терапии, создаваемого в рамках проекта «ЛУЧ-ПРОТОН».

A.A. MALYSHEV, E.D. TSYPLAKOV, A.V. KOZLOV, N.V. MARKOV, T.V. KULEVOY
National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

DIPOLE MAGNETS' NUMERICAL MODELING FOR “LUCH-PROTON” MEDICAL ACCERATION COMPLEX

The presented study demonstrates the results of warm dipole magnets' numerical modeling for different beam transport channels of proton medical synchrotron “LUCH-PROTON” dedicated for cancer therapy, which were obtained using the special program environment for electromagnetic simulation.

В настоящий момент в НИЦ «Курчатовский институт» ККТЭФ проводится эскизное проектирование медицинского ускорительного комплекса на базе протонного синхротрона, предназначенного для лучевой терапии в диапазоне энергии 70-250 МэВ [0]. Для компоновки транспортных каналов пучка высоких (250 МэВ) и низких (4 МэВ) энергии ведётся разработка численных моделей секторных и прямоугольных дипольных магнитов с различной конфигурацией магнитопровода [0],[0]. Основное внимание отводится оптимизации конструктивных элементов магнитопровода [0], достижению требуемых значений интегралов на оси пучка (0.65 Тл·м для С-образного, 1.23 Тл·м для Ш-образного), зон хорошего поля в рабочей области с заданным допуском на неоднородность $\Delta B/B=0.5\%$ и электротехническим параметрам (мощность, индуктивность, интегральный ток), которые учитывают ограничения со стороны питающей системы при работе магнитов в импульсном режиме.

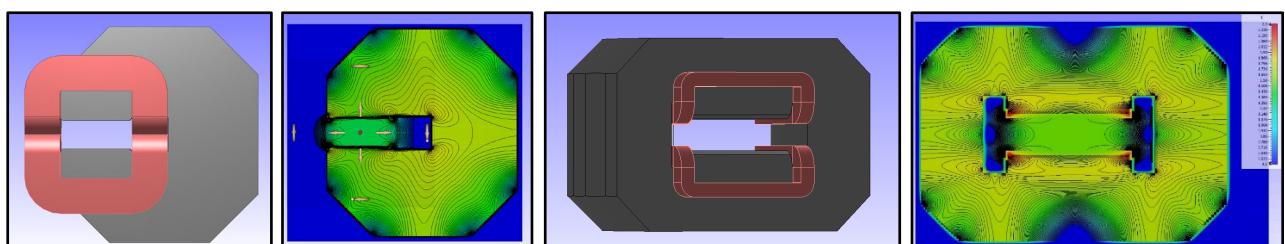


Рис. 1. Численные модели дипольных С-образных и Ш-образных магнитов и картины распределения полей в поперечном сечении конструкций

Список литературы

1. Dr Alexey Chernykh (2023). Модель магнито-оптической структуры протонного синхротрона комплекса протонной лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт». Contribution List of Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23)
2. Iwashita, Yoshihisa et al. (1999). Novel Design for Electromagnet with Wide Excitation Range. *Japanese Journal of Applied Physics*, 38: 895-897. doi 10.1143/JJAP.38. L895
3. S. Terner, Cern Accelerator School, Fifth general accelerator physics course, “Proceedings Vol.II” September 9-18,1992, University of Jyvaskyla, Finland, pp.875-880
4. Th. Zickler, “Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets”, CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets, pp. 91-94, Bruges, June 2009.

Секция
**ДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ И УДАРНО-
ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
УСЛОВИЯХ**

Руководитель секции

— д.ф.-м.н., профессор
Губин Сергей Александрович

Секретарь секции

— Маклашова
Ирина Владимировна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9917

E-mail: SAGubin@mephi.ru, IVMaklashova@mephi.ru

А.И. САВВАТИМСКИЙ, С.В.ОНУФРИЕВ
 Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СВЕРХ-ТУГОПЛАВКОЙ КЕРАМИКИ $\text{HfC}_{0.51}\text{N}_{0.32}$ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 2000-5500 К

Представлены экспериментальные результаты исследования температурных зависимостей энталпии, теплоемкости и удельного электросопротивления карбонитрида гафния $\text{HfC}_{0.51}\text{N}_{0.32}$ в твердом, жидким состояниях и при плавлении в интервале температур 2500-5500 К. Исследование выполнено с помощью метода быстрого 5-10 мкс импульсного нагрева током. Сопоставление полученных данных по энталпии и теплоемкости для $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$ с такими же зависимостями для HfC (Рис. 1, 2) показывает, что плавление $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$ происходит в более широком интервале температур по сравнению с HfC .

A.I. SAVVATIMSKIY^{1,2}, S.V.ONUFRIEV¹

¹Joint institute for high temperatures of RAS, Moscow, Russia

²P.N.Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES FOR ULTRA-REFRACTORY CERAMICS $\text{HfC}_{0.51}\text{N}_{0.32}$ IN THE TEMPERATURE RANGE OF 2500-5500 K

Experimental results of a study of the temperature dependences of enthalpy, heat capacity, and electrical resistivity of hafnium carbonitride $\text{HfC}_{0.51}\text{N}_{0.32}$ in solid, liquid, and melting states in the temperature range of 2500-5500 K. are presented. The study was performed using the method of rapid 5-10 microseconds pulsed current heating. A comparison of the obtained data on enthalpy and heat capacity for $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$ with the same dependences for HfC (Рис. 1, 2) shows that the melting of $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$ occurs over a wider temperature range compared with HfC .

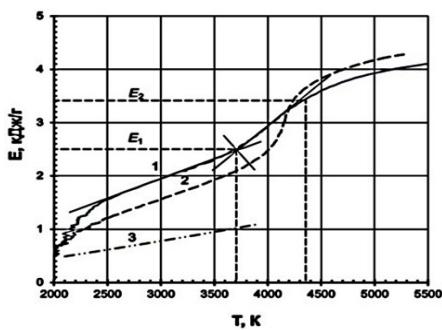


Рис. 1. [1]. Температурная зависимость энергии джоулева нагрева (энталпии) $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$: 1 – сплошная линия – настоящая работа, $\varepsilon_{\lambda n} = 0.7$; 2 (пунктир) – данные для HfC [2], $\varepsilon_{\lambda n} = 0.6$; 3 – оценка для HfC . Энталпии начала и окончания плавления равны: $E_1 \approx 2.5 \text{ кДж/г}$; $E_2 \approx 3.4 \text{ кДж/г}$.

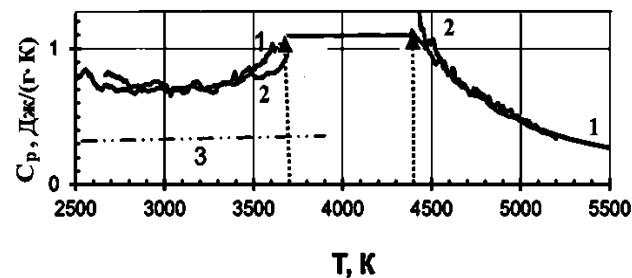


Рис. 2. [1]. Температурная зависимость теплоемкости $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$: 1 – данные авторов для $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$, $\varepsilon_{\lambda n} = 0.7$; 2 – данные [2] для HfC , $\varepsilon_{\lambda n} = 0.6$; 3 – оценка теплоемкости твердой фазы HfC (штрихпунктирная линия).

Подчеркнем итоговый результат эксперимента: а) плавление $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$ происходит в более широком интервале температур по сравнению с HfC , (от 4200 К до 4400-4500 К); б) теплоемкости двух соединений практически совпадают. Отметим, что после плавления теплоемкость $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$ снижается (как и для других карбидов) и при $T = 5000 \text{ K}$ и практически сравнивается с оценкой 3 (Рис. 2).

Температура измерялась по световому излучению на длине волн 856 нм. Использовался оптический пирометр с пятном визирования 0.9 мм, который калибровался по температурной лампе при температуре 2515 К. Температурная шкала воспроизводилась на основе формулы Планка с принятой излучательной способностью 0.7. Температуры плавления $\text{Hf}(\text{C},\text{N})$ составила 4400-4500 К, что выше, чем температура плавления для HfC (4200 К) [2, 3].

Работа выполнена совместно с МИСИС.

Список литературы

1. Онуфриев С.В., Савватимский А.И., Суворова В.С., Непапушев А.А., Московских Д.О. // Исследование свойств сверхтугоплавкой керамики $\text{HfC}_{0.51}\text{N}_{0.32}$ в интервале температур 2500–5500 К. ТВТ. 2024. том 62, выпуск 2, 207–214
2. Savvatimskiy A.I., Onufriev S.V., Valyano G.E., and Muboyadzhyan S.A. // Thermophysical properties for hafnium carbide (HfC) versus temperature from 2000 to 5000 K (experiment) J. Mater. Sci. (2020) 55:13559-13568.
3. Савватимский А.И., Онуфриев С.В., Аристова Н.М., Исследование физических свойств тугоплавких карбидов металлов IV и V групп периодической таблицы Д.И.Менделеева при быстром нагреве импульсом электрического тока, УФН. 1922. Т.192, №6. 642-662.

А.И. САВВАТИМСКИЙ, С.В.ОНУФРИЕВ
 Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХ-ТУГОПЛАВКОЙ КЕРАМИКИ ZRB₂ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 2000-5000 К (ЭКСПЕРИМЕНТ)

Исследованы теплофизические свойства и электросопротивление диборида циркония ZrB₂ [1] при плавлении и в жидкой фазе при температурах 2500 – 5500 К. Эксперимент выполнен методом нагрева импульсом тока микросекундной длительности — методом «взрыва проводников» С.В.Лебедева на пластинках спеченного ZrB₂. Измеренная температура начала плавления ZrB₂ ~ 3400 К, согласуется с фазовой диаграммой В–Zr. Установлено, что в твердой фазе теплоемкость Cp в два раза больше справочных данных, а в жидкой фазе наблюдается ее монотонное снижение. Для объяснения расхождений с расчетными данными используется гипотеза об определяющей роли парных дефектов Френкеля в области плавления быстро нагреваемого вещества. Увеличение внешнего давления – привело росту температуры плавления ZrB₂ (с 3700 до 4000 К).

A.I. SAVVATIMSKIY^{1,2}, S.V.ONUFRIEV¹

¹Joint institute for high temperatures of RAS, Moscow, Russia

²P.N.Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

PHYSICAL PROPERTIES OF ULTRA-REFRACTORY CERAMICS ZrB₂ AT TEMPERATURES OF 2000-5000 K (EXPERIMENT)

The thermophysical properties and electrical resistance of zirconium diboride [1] during melting and in the liquid phase at temperatures of 2500 – 5500 K. The experiment was performed by heating with a microsecond current pulse — the method of S.V.Lebedev's "conductor explosion" of sintered ZrB₂ plates. The measured melting point of ZrB₂ is ~ 3400 K, consistent with the B–Zr phase diagram. It is established that in the solid phase the heat capacity of Cp is twice as high as the reference data, and in the liquid phase its monotonous decrease is observed. To explain the discrepancies with the calculated data, the hypothesis of the determining role of paired Frenkel defects in the melting of a rapidly heated substance is used. An increase in external pressure led to an increase in the melting point of ZrB₂ (from 3700 to 4000 K).

В импульсном процессе нагрева теплоемкость твердой фазы вблизи плавления, как правило, значительно выше прогнозируемых значений по двум основаниям: а) исходные дефекты и примеси требуют дополнительной энергии для их быстрого растворения в жидкости; б) перед самым плавлением возникают парные дефекты Френкеля, насыщающие объем дополнительными вакансиями - для обеспечения быстрого плавления в условиях медленной диффузии равновесных вакансий.

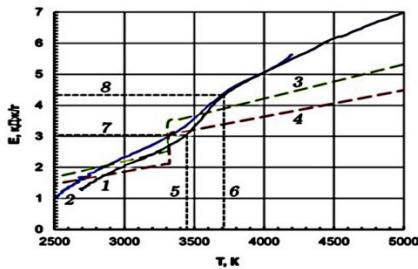


Рис. 1. Температурные зависимости удельной энталпии Е для образцов ZrB₂: 1 – образец № 1 (более быстрый нагрев); 2 – образец № 2; 3 – расчетные данные; 4 – расчетные данные; 5 и 6 – температуры начала Т=3450 К и окончания Т=3700 К плавления образца № 1; 7 и 8 – соответствующие этим температурам энергии.

Подчеркнем существенный результат эксперимента: а) достижение высоких температур жидкой фазы ZrB₂ (при 3500 – 5000 К), требует затрат энергии Е значительно выше прогнозируемых значений (Рис. 1); б) повышенное внешнее давление – приводит к повышению сопротивления и тугоплавкости ZrB₂ (Рис. 2).

Температура измерялась по световому излучению на длине волны 856 нм. Использовался оптический пирометр с пятном визирования 0.9 мм, который калибровался по температурной лампе при температуре 2515 К. Температурная шкала воспроизводилась на основе формулы Планка с принятой излучательной способностью 0.7.

Список литературы

1. Онуфриев С.В., Савватимский А.И., Физические свойства диборида циркония при температуре 2500–5000 К // ЖЭТФ - 2024. - том 166, вып. 5 (11), стр. 641–654.
2. Онуфриев С.В., Савватимский А.И., Влияние повышенного давления на электросопротивление диборида циркония ZrB₂ при плавлении и в жидкой фазе, Печатается в журнале Термофизика высоких температур, 2025.

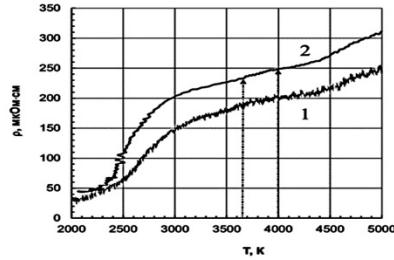


Рис. 2. Зависимость удельного электросопротивления ZrB₂ от температуры: 1 – при малом внешнем давлении ~ 100 бар; 2 – электросопротивление при повышенном давлении ~ 500 бар. Стрелками указано электросопротивление образца (кривая 2) в начале плавления (температура поверхности 3650 К) и при его окончании (температура поверхности 4000 К).

В.А. ПУШКОВ, Ю.В. БАТЬКОВ
Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЦЕРИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассмотрены результаты работы [1] по изучения динамической трещиностойкости церия. Трещиностойкость церия K_{Ic} определена по результатам опытов на откольную прочность при ударном нагружении.

V.A. PUSHKOV, Y.V. BATKOV
Sarov Physical & Technical Institute - National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Russia

CRACK-RESISTANCE AND SPALL STRENGTH OF CERIUM UNDER DYNAMIC LOADING

The results of cerium dynamic crack resistance studies defined in paper [1] are considered. Cerium crack resistance K_{Ic} is determined from the data of spall strength experiments under strike loading.

Редкоземельный элемент церий используется в металлургии, применяется для получения специальных стекол и керамики, а также для производства ядерного топлива. Для церия известны такие характеристики, как коэффициент Пуассона, прочность при статическом сжатии и растяжении [2], скорость звука, кинетика фазовых превращений при ударном сжатии [3] и некоторые другие характеристики. В то же время важные для ряда практических случаев характеристики церия при динамическом нагружении, такие, как динамическая трещиностойкость и откольная прочность, изучены недостаточно. Например, трещиностойкость материала является одним из параметров модели, с использованием которой проводится расчетное описание процесса диспергирования [4].

На первом этапе в работе [1] были проведены эксперименты по изучению динамической трещиностойкости методом составного стержня Гопкинсона, но из-за значительной пластичности церия определить величину трещиностойкости не удалось. Поэтому ее определение было проведено путем исследования откольной прочности церия σ_p . Используя теорию линейной механики разрушения по величине σ_p можно определить удельную работу по отрыву материала λ [5], исходя из которой по критерию Ирвина-Гриффита [6] далее можно определить величину трещиностойкости K_{Ic} . В экспериментах нагружение образцов церия плоским медным ударником проводили на пневматической установке, скорость ударника была в пределах 100-400 м/с [1]. Профиль скорости свободной поверхности образца $W(t)$, зарегистрированный лазерным интерферометром в одном из опытов, приведен на рис. 1.

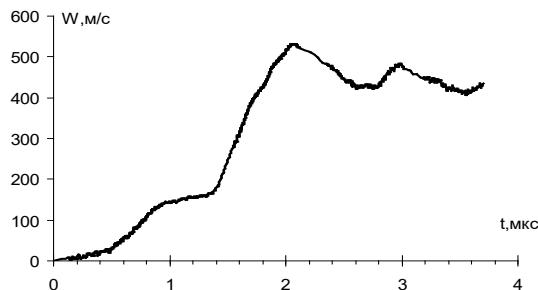


Рис. 1. Профиль скорости свободной поверхности образца из церия, зарегистрированный лазерным интерферометром в процессе его нагружения ударником толщиной 1 мм, летящим со скоростью $W = 392$ м/с

По данным о плотности, скорости звука, коэффициенте Пуассона, модуле Юнга, скорости ударника, откольной прочности определена динамическая трещиностойкость церия K_{Ic} [1]. Результаты будут полезны для разработки физико-математических моделей поведения церия и узлов его содержащих при воздействии различных нагрузок.

Список литературы

1. В.А. Пушков. Трещиностойкость и откольная прочность церия при динамическом нагружении // Сборник Трудов Международной Конференции «Актиниды», 2009, Сан-Франциско. США, с. 159-160.
2. К. Тэйлор, М. Дарби. Физика редкоземельных соединений М.: Наука, 1979.
3. В.Г. Симаков, В.А. Борисенок, В.А. Брагунец и др. Исследование фазовых превращений в железе и церии ПВДФ-датчиками давления // Сб. Тезисов докладов. Int. Conf. "Shock Waves in Condensed Matter", S.-Petersburg, 3-8 Sept., 2006, p.19-21.
4. А.К. Жиembетов, Г.С. Смирнов, А.Л. Михайлов и др. Кавитационный способ определения параметров плавления ударно-сжатых веществ при объемном расширении. // Химическая Физика, 2005, т.24, №10, с.57-65.
5. Разрушение разномасштабных объектов. Под редакцией А.Г. Иванова, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2001.
6. В.З. Парсон, Е.М. Морозов. Механика упруго-пластического разрушения, Наука, М, 1974.

А.В. ФЕДОТОВА, Ю.В. БАТЬКОВ, И.А. ТЕРЕШКИНА, И.Р. ТРУНИН
 Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

СЖАТИЕ И ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛИ 3 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛАБОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Представлен подход, позволяющий рассмотреть картину волновых взаимодействий вблизи свободной поверхности ударно-нагруженных образцов, согласно которой была построена ударная адиабата стали 3 в низкой области нагружения. В работе предлагается оценивать значение скорости ударной волны D в случае её упругопластической конфигурации по регистрации времени выхода первых упругих предвестников на свободную поверхность образца. Проведено численное моделирование экспериментов со сталью 3 в низкой области ударного нагружения с использованием УРС в форме Ми-Грюнайзена с параметрами, полученными по представленному подходу в данной работе, и дислокационной моделью деформирования.

A.V. FEDOTOVA, Y.V. BATKOV, I.A. TERESHKINA, I.R. TRUNIN
Sarov Physical & Technical Institute - National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Russia

COMPRESSION AND DEFORMATION OF STEEL 3 UNDER THE INFLUENCE OF A WEAK SHOCK WAVE

An approach is presented that allows us to consider the pattern of wave interaction near the free surface of shock-loaded samples, according to which the shock adiabate of steel 3 was constructed in a low loading region. The paper proposes to estimate the value of the velocity of the shock wave D , in the case of its elastic-plastic configuration, by recording the time of the first elastic precursors on the free surface of the sample. Numerical modeling of experiments with steel 3 in the low impact region has been carried out using the Mi-Gruneisen equation of state with the parameters obtained using the presented approach in this paper and a dislocation deformation model.

Ограниченностю экспериментальных данных по ударно-волновому сжатию веществ при воздействии «слабых» УВ, когда скорость ударной волны меньше продольной скорости звука [1], требует проведения дополнительных экспериментально-расчётных исследований. В работе рассматривается диапазон динамических нагрузок, соответствующий воздействию веществ «слабой» ударной волной с амплитудой до ~ 13 ГПа, скорость ее распространения близка к скорости звука, волна сжимает вещество всего на несколько процентов и сообщает ему скорость за фронтом в десятки раз меньше, чем скорость распространения самой волны. Образцы из стали 3 (содержание железа $\geq 99\%$) различной толщины нагружались ударником из стали 3, разогнанным в легкогазовой пушке до различных скоростей W_{y0} . В опытах с помощью лазерной доплеровской оптогетеродиновой методики (PDV) измерялись скорости движения свободных поверхностей (СП) образцов.

Оценка скорости ударной волны проводилась по уравнению $D = C_L \left(\frac{1-A}{1+A} \right)$, где $A = C_L \frac{(t_2-t_1)}{2L}$, где t_1 и t_2 - времена выхода первого и второго УП, C_L – продольная скорость звука. Полученные таким способом значения D и соответствующие этим значениям массовые скорости частиц за фронтом УВ U представлены в виде $D - U$ зависимости на рис. 1, где также показана их аппроксимация линейной зависимостью: $D = c_0 + \lambda U$. При построении линейной аппроксимации учитывались значения скоростей, соответствующие началу α - ϵ фазового перехода в железе при давлении $P \approx 13$ ГПа (на рис. 1 – чёрный круг: $U_{\alpha-\epsilon} \approx 0,32$ км/с, $D_{\alpha-\epsilon} \approx 5,01$ км/с).

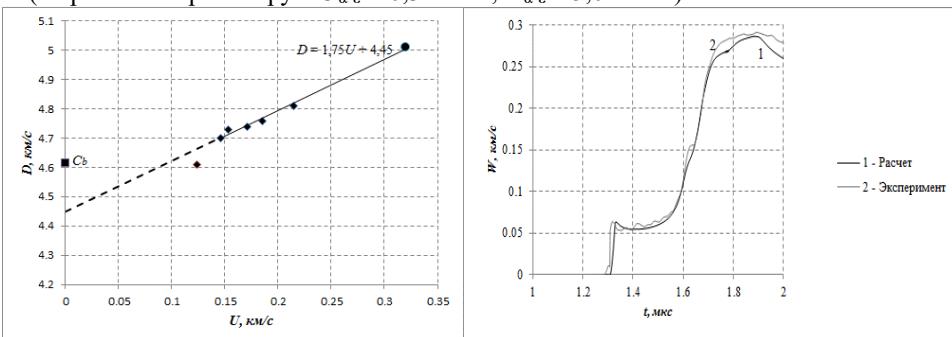


Рис. 1 – Зависимость скорости ударной волны D от массовой скорости за фронтом волны U в стали 3 и сравнение расчётов и экспериментальных зависимостей скорости движения свободной поверхности ($W_{y0}=306$ м/с)

По построенной ударной адиабате $D(U)$ в низкой области ударного нагружения были определены значения параметров УРС Ми-Грюнайзена: $c_0 = 4,45$ км/с, $n = 6$, $h = 1,705$. С таким УРС и дислокационной моделью деформирования [2] проведено численное моделирование экспериментов. Один из расчетов представлен на рис. 1, где сравниваются фронтальные участки скорости СП - $W(t)$.

Список литературы

- 1 Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Научное издание под редакцией Р.Ф. Трунина. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Саров. 2006. 530 с.
- 2 J.W. Taylor. Dislocation dynamics and dynamic yielding. J. Appl. Phys. V. 36. № 10. 1965. 3165-3170 p.

Е.А. БИЛЛЕ¹, С.А. ГУБИН^{1,2}, И.В. МАКЛАШОВА¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Получены расчетные оценки критических параметров самовоспламенения конденсированных энергетических веществ.

E.A. BILLE¹, S.A. GUBIN^{1,2}, I.V. MAKLASHOVA¹

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Science, Moscow, Russia

ESTIMATES OF CRITICAL PARAMETERS OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF CONDENSED ENERGY SUBSTANCES UNDER THERMAL EFFECTS

Calculated estimates of the critical parameters of spontaneous combustion of condensed energy substances have been obtained.

Самовоспламенение — резкое самоускорение экзотермических химических реакций, при определенных (критических) условиях, когда тепловыделение в ходе реакции оказывается больше теплоотвода в окружающую среду. Расчетные оценки критических параметров самовоспламенения конденсированных энергетических веществ при тепловых воздействиях, нужны для разработки рекомендаций по взрывобезопасности. Эти рекомендации требуются для предприятий многих отраслей промышленности (химическая, горнодобывающая, нефтяная и др.).

Химические реакции термического разложения конденсированных веществ имеют высокие значения энталпии и энергии активации, что приводит к сильной зависимости скорости реакции от температуры. Вследствие этого, энергетическое вещество, способное храниться при комнатной температуре неограниченно долго, может воспламениться или взорваться при достижении критической температуры самовоспламенения. Поэтому оценка критических параметров и условий самовоспламенения (теплового взрыва) имеют большое практическое значение для прогноза опасности взрыва и являются актуальной задачей.

Цель данной работы – оценка критических параметров (температура горячего очага - $T_{\text{кр}}$, радиус очага - $r_{\text{кр}}$ и задержка самовоспламенения - $t_{\text{инд}}$) в зависимости от размера и формы заряда для некоторых энергетических веществ. $T_{\text{кр}}$ - наименьшая температура вещества, при нагреве до которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических объемных реакций, приводящее к возникновению самовоспламенения или теплового взрыва.

Математическая теория теплового взрыва была развита в работах Семенова, Тодеса, Франк-Каменецкого [1], Мержанова и др. [2].

Обычно, реакция идет не во всей массе вещества, а в локальных местах - очагах реакции. В нашей модели предполагалось, что в некоторый момент времени в веществе возникает сферический очаг, размер которого много меньше размера образца. Процессы образования горячего очага и фазовые переходы не рассматривались. В расчетах использовались корректные данные по кинетике реакции термического разложения выбранных энергетических веществ.

Стационарная теория самовоспламенения позволяет вычислить непрерывное распределение температуры по координате для разных значений начальной температуры образца по известным значениям энталпии реакции, коэффициента теплопроводности, константы скорости и энергии активации химической реакции термического разложения энергетических веществ элементного состава CHNO. При этом, находится значение критической температуры самовоспламенения в очаге $T_{\text{кр}}$. Полученные значения критической температуры дают возможность оценить критические значения размера горячего очага $r_{\text{кр}}$ и задержки самовоспламенения $t_{\text{инд}}$ в зависимости от формы и размера заряда энергетического вещества.

Список литературы

1. D. A. Frank-Kamenetsky, "Diffusion and Heat Exchange in Reaction Kinetics", Academy of Sciences of the USSR, 1947 (1st ed.).
2. A. G. Merzhanov and V. G. Abramov. // Propellants and Explosives 6, 13148 (1981).

Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА¹, Г.Л. АГАФОНОВ¹, Э.К. АНДЕРЖАНОВ¹, А.С. БЕТЕВ¹, А.М. ТЕРЕЗА¹
С.В. ХОМИК¹, С.П. МЕДВЕДЕВ¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СТРУКТУРЫ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ В ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Проведено численное моделирование распространения ламинарного пламени в бедной, стехиометрической и богатой водородно-воздушной смеси для давлений 1 и 6 атм при начальной температуре 298 К. Расчеты проводились с помощью программного модуля CHEMKIN-Pro с использованием трех детальных кинетических механизмов (ДКМ), представленных в литературе. Показано, что, несмотря на принципиальные различия в ДКМ, результаты расчетов чувствительности профиля температуры к константам скорости элементарных реакций и форма самих профилей исходных реагентов и продуктов не зависят от выбора ДКМ и давления. Наличие особой точки, в которой при расчетах с использованием CHEMKIN-Pro все скорости реакций равны нулю, определяет сложный характер профиля концентрации молекулярного водорода с двумя перегибами. Для богатых смесей обнаружено двухстадийное нарастание концентрации радикала OH до достижения максимума. В тоже время наблюдается двухстадийная убыль концентрации радикала H₂O₂ после достижения ее максимума.

T.T. CHEREPANOVA¹, G.L. AGAFONOV¹, E.K. ANDERZHANOV¹, A.S. BETEV¹, A.M. TEREZA¹, S.V. KHOMIK¹,
S.P. MEDVEDEV¹

¹N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SOME CHARACTERISTICS OF THE STRUCTURE OF LAMINAR PREMIXED HYDROGEN–AIR FLAME

Numerical simulations are performed of laminar flame propagation in lean, stoichiometric, and rich hydrogen-air mixtures at pressures of 1 and 6 atm and an initial temperature of 298 K. The computations were performed using the CHEMKIN-Pro software module with three detailed kinetic mechanisms (DKMs) presented in the literature. It is shown that, despite essential differences in DKM, both the calculated sensitivities of the temperature profile to the rate constants for elementary reaction steps and the concentration profiles of reactants and products are independent of the choice of DKM and pressure. The existence of a special point at which all reaction rates are zero in calculations using CHEMKIN-Pro determines the complex form of the molecular hydrogen concentration profile with two kinks. For rich mixtures, the OH radical concentration exhibits a two-stage increase before reaching a maximum. At the same time, a two-stage decrease in the H₂O₂ radical concentration is observed after its maximum is reached.

Изучение распространения пламени в водородно-воздушных смесях важно для широкого класса задач, связанных с проблемами водородной энергетики. Развитие технологий стабильного и безопасного горения водорода требует фундаментальных знаний процесса распространения пламени в диапазоне составов смесей, ограниченном концентрационными пределами воспламенения. Одной из важнейших задач с точки зрения понимания взаимосвязи теплопередачи, диффузии и химической кинетики является знание структуры пламени [1]. Ввиду сложности получения надежных экспериментальных результатов о структуре водородно-воздушного пламени рациональным является численное моделирование ламинарного пламени, методики которого в настоящее время достаточно хорошо разработаны [2]. Наиболее популярным инструментом реализации такого подхода является программный модуль PREMIX, входящий в пакет программ CHEMKIN-Pro [3].

В представленной работе осуществлено численное моделирование распространения ламинарного пламени в бедной (15%H₂), стехиометрической (29.6%H₂) и богатой (50%H₂) водородно-воздушных смесях для давлений 1 и 6 атм при начальной температуре 298 К. Расчеты проводились с использованием представленных в литературе трех детальных кинетических механизмов (ДКМ), отличающихся как используемым набором элементарных химических реакций, так и значениями параметров соответствующих констант скорости [4–6]. Показано, что все три ДКМ предсказывают одинаковые формы профилей и близкие значения концентраций в активной зоне пламени для обоих значений давления. Расчет нормальной скорости горения S_L на основе этих трех ДКМ также дает близкие значения для трех исследованных смесей. Не обнаружено заметной зависимости от выбора ДКМ чувствительности профиля температуры к константам скорости элементарных реакций, определяющих тепловыделение. В тоже время при совместном решении уравнений кинетики, теплопередачи и диффузии с помощью программного модуля [3] наличие особой точки в сечении пламени, в которой скорости всех элементарных реакций обращаются в нуль, определяет сложный характер профиля концентрации молекулярного водорода с двумя перегибами. Для богатых смесей обнаружено двухстадийное нарастание концентрации радикала OH до достижения максимума. В тоже время наблюдается двухстадийная убыль концентрации радикала H₂O₂ после достижения ее максимума для всех трех смесей.

Список литературы

1. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука. 1987
2. Sanchez A.L., Williams F.A. // Progress Energy Combust. Sci. 2014. V. 41. P. 1.
3. CHEMKIN-Pro 15112, Reaction Design: San Diego, CK-TUT-10112-1112-UG-1, 2011.
4. Keromnes A., Metcalfe W.K., Heufer K.A., et al. // Combust. Flame. 2013. V. 160. P. 995.
5. Konnov A.A. // Combust. Flame. 2019. V. 203. P. 14.
6. Krivosheyev P., Kiselyov Y., Skilandz A., Sevrouk K., Penyazkov O., Tereza A. // Int. J. Hydrogen Energy. 2024. V. 66. P. 81.

А.Э. КОЗАЧЕНКО^{1,2}, Г.Л. АГАФОНОВ¹, А. С. БЕТЕВ¹, А.М. ТЕРЕЗА¹, С.П. МЕДВЕДЕВ¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова, РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИРОЛИЗА И САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРОПЕНА В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Посредством численного моделирования проведено описание экспериментально наблюдаемого пиролиза и самовоспламенения пропена за отраженными ударными волнами. Использовались несколько детальных кинетических механизмов (ДКМ), представленных в литературе. Экспериментальные данные были взяты также из литературы. Установлено, что если задержки воспламенения описываются достаточно хорошо всеми ДКМ, то описание профилей выхода атомов Н при пиролизе пропена фактически не описываются ни одним из рассмотренных ДКМ. Среди реакций, определяющих пиролиз пропена, выявлены наиболее важные, для которых требуется уточнение значений параметров их констант скорости.

A.E. KOZACHENKO^{1,2}, G.L. AGAFONOV¹, A.S. BETEV¹, A.M. TEREZA¹, S.P. MEDVEDEV¹

¹N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF PROPENE PYROLYSIS AND AUTOIGNITION IN SHOCK WAVES

Numerical modeling is used to describe propene pyrolysis and autoignition observed experimentally behind reflected shock waves. Several detailed kinetic mechanisms (DKMs) presented in the literature are applied. Experimental data are also borrowed from the literature. It is found that ignition delay times are sufficiently well predicted with all DKMs, whereas the time-dependent concentration profiles of hydrogen atoms generated by propene pyrolysis cannot be obtained by using the DKMs employed. Among the reactions involved in propene pyrolysis, the most important ones are identified, for which the values of rate constant parameters should be revised.

Изучение воспламенения и пиролиза пропена представляет интерес как с точки зрения его топливных свойств [1], так и для уточнения параметров детальных кинетических механизмов (ДКМ) горения углеводородных топлив высшего порядка ($>C_2$) [2]. Учитывая, что пропен активно образуется при температурной утилизации различных отходов химической промышленности, важно знать кинетику химических реакций при его пиролизе и воспламенении.

Все расчеты проводились с использованием программного модуля [3]. Использовались ДКМ работ [4–6]. Посредством численного моделирования проведено описание экспериментально наблюдаемого выхода атомов Н, измеренного методом ARAS при пиролизе пропена за отраженными ударными волнами в диапазоне температур 1340–1910 К при давлениях 0.4–4.6 атм с аргоном в качестве разбавителя при концентрациях $3.5 \cdot 10^{-11}$ – $1.8 \cdot 10^{-10}$ моль/см³ [2]. Установлено, что ни один из выбранных ДКМ не описывает выход атомов Н. В тоже время использование всех трех ДКМ при описании ударно-трубных измерений задержек воспламенения пропена в диапазоне температуры 1100–1750 К при давлениях от 2 до 40 атм с коэффициентом топливо/окислитель (ϕ) от 0.5 до 2 и разбавлением аргоном от 72 до 96% [1] показало хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

Анализ показал, что для улучшения численного моделирования пиролиза пропена необходимо уточнить константы скорости диссоциации C_3H_6 и C_3H_5 в зависимости от давления.

Список литературы

1. Burke S.M., Burke U., Mc Donagh R., et al // Combust. Flame. 2015. V. 162. P. 296.
2. Weber I., Golka L., Olzmann M. // Proceed. Combust. Symp. 2017. V. 36(1). P. 299.
3. CHEMKIN-Pro 15112, Reaction Design: San Diego, CK-TUT-10112-1112-UG-1, 2011.
4. Wang H., Warner S.J., Oehlschlaeger M.A., et al // Combust. Flame. 2010. V. 157. P. 1976.
5. Metcalfe W.K., Burke S.M., Ahmed S.S., et al // Int. J. Chem. Kinet. 2013. V. 45. P. 638.
6. Tereza A.M., Medvedev S.P., Smirnov V.N. // Acta Astronautica. 2020. V. 176. P. 653.

М.А. ПАРАМОНОВ, Д.В. МИНАКОВ, П.Р. ЛЕВАШОВ
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВИНЦА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Исследованы термодинамические свойства свинца, в том числе в сверхкритическом состоянии, с использованием метода квантовой молекулярной динамики без привлечения экспериментальных данных. В рамках единой модели из первых принципов анализируются давление, энталпия и тепловое расширение. Последовательно выполняется интерпретация экспериментальных данных по изобарическому расширению; производится оценка кривой сосуществования жидкость—газ и критической точки для Pb на основе численных расчетов.

M.A. PARAMONOV, D.V. MINAKOV, P.R. LEVASHOV
Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

FIRST-PRINCIPLES STUDY OF THERMODYNAMIC PROPERTIES OF LEAD AT HIGH TEMPERATURES

The thermodynamic properties of lead, including the supercritical state, are investigated using the quantum molecular dynamics method without involving experimental data. Pressure, enthalpy and thermal expansion are analyzed within a unified first-principles model. The interpretation of experimental data on isobaric expansion is performed; the liquid-gas coexistence curve and the critical point for Pb are estimated on the basis of numerical calculations.

Уникальные физико-химические свойства свинца делают его незаменимым в различных областях промышленности, особенно в атомной энергетике, где он ценится за эффективность в качестве теплоносителя и радиационной защиты в современных реакторах благодаря высокой плотности, отличной коррозионной стойкости и способности поглощать радиацию. А точное измерение параметров критической точки и транспортных свойств свинца имеет первостепенное значение для обеспечения безопасного проектирования и эксплуатации ядерных реакторов.

Область жидкой фазы вещества и сверхкритическое состояние могут быть достигнуты в экспериментах по адиабатическому расширению. Однако, доступно только несколько измерений температуры в сжатых металлах, а также аналогичные измерения в волнах изоэнтропического расширения. Кроме того, особое значение имеют термодинамически полные данные, полученные с использованием метода изобарического расширения (IEX). Однако интерпретация экспериментов IEX часто затруднена из-за скорости и сложности происходящих физических явлений. Этот факт может объяснить часто встречающееся несоответствие между экспериментальными данными по изобарическому расширению для некоторых металлов, в том числе для свинца.

Метод квантовой молекулярной динамики (КМД) все чаще используется для определения физических свойств материалов в температурных диапазонах, где трудно воспроизвести экспериментальные данные или где эксперименты совершенно нецелесообразны. Этот метод основан на теории функционала электронной плотности (DFT - density functional theory), но также учитывает движение ионов. В настоящее время в расчетах могут использоваться более 1000 атомов, что позволяет изучать неупорядоченные системы и даже фазовые переходы. Это делает КМД перспективным методом для описания высокотемпературных свойств циркония в широком диапазоне параметров. Для выполнения первопринципного моделирования использовался программный код VASP.

Целью данной работы является исследование термодинамических и транспортных свойств свинца в окрестности двухфазной границы жидкость-газ с помощью метода КМД. Проведены расчеты подробной сетки изотерм и изохор для жидкой фазы свинца, оценка критических параметров, кривой теплового расширения и вязкости. Также анализируются и обсуждаются имеющиеся соответствующие экспериментальные данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 24-79-00136, <https://rscf.ru/project/24-79-00136/>).

А.С. СМАЛЬ, Ю.А. БОГДАНОВА, А.А. СУРАЕВА, А.А. ЕГОРОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕТОДЫ КВАНТОВОГО МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГИИ АДСОРБЦИИ ВОДОРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ НИКЕЛЯ

Исследование и адаптация методики расчёта энергии адсорбции водорода на поверхности никеля с использованием методов квантового молекулярно-динамического моделирования. Анализируется зависимость этой энергии от положения атома водорода относительно поверхности никеля. Даётся подробное описание подходов, применяемых для вычислений, а также рассматриваются полученные результаты и их значение для понимания взаимодействий между водородом и никелем.

A.S. SMAL, Y.A. BOGDANOVA, A.A. SURAeva, A.A. EGOROV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

METHODS OF QUANTUM MOLECULAR DYNAMIC MODELING FOR THE STUDY OF HYDROGEN ADSORPTION ENERGY ON METAL SURFACES USING THE EXAMPLE OF NICKEL

The research and adaptation of the calculation methodology of the hydrogen adsorption energy on the nickel surface by quantum molecular dynamics modeling methods is considered. The dependence of this energy on the position of the hydrogen atom relative to the nickel surface is analyzed. A detailed description of the approaches used for calculations is given, as well as the results obtained and their significance for understanding the interactions between hydrogen and nickel.

Изучение свойств веществ имеет огромное значение для различных областей науки и техники, а глубокое понимание их химического состава, структуры и поведения является ключевым аспектом в разработке новых материалов, изучении физических и химических процессов. В современной физико-химической науке широко применяются компьютерные методы для моделирования и анализа свойств молекул и материалов на атомарном уровне. Одним из таких методов, используемых в работе, является теория функционала плотности (ТФП), которая позволяет описывать электронную структуру системы на основе распределения электронной плотности [1]. Основная идея метода ТФП заключается в выражении свойств системы через функционал электронной плотности, которая определяется как вероятность нахождения электронов в данной точке пространства. Фундаментальными уравнениями в рамках ТФП, описывающими поведение электронов в системе, являются уравнения Кона-Шэма.

В данной работе было проведено исследование поверхностных процессов взаимодействия водорода и никеля с использованием программного пакета Quantum ESPRESSO [2], который основан на методе ТФП для выполнения расчетов. В Quantum ESPRESSO расчеты проводятся с использованием периодических граничных условий по всем пространственным координатам. Модель поверхности формируется путем фиксации части нижних слоев структуры и введения «вакуума» (пустого пространства), что позволяет избежать взаимодействия поверхностной плиты с её периодическим изображением [3].

Энергия адсорбции рассчитывалась как разность энергии между взаимодействующей системой (молекулой водорода на поверхности никеля) и невзаимодействующими структурами (отдельно водородом и поверхностью никеля):

$$E_{ads} = -(E(M + H) - E(M) - \frac{1}{2}E(H_2))$$

Исследование взаимодействия водорода с металлами представляет собой актуальную тему, которая имеет большое значение в современной науке и технологиях. Возможные приложения таких исследований включают в себя разработку более эффективных материалов для хранения и транспортировки водорода, а также для создания более эффективных катализаторов в водородной энергетике.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект 8 «Физика изотопов водорода», направление 8.1 «Исследования в области взаимодействия изотопов водорода с твердым телом»)

Список литературы

1. Аксенова Е.В., Кшевецкий М.С. Вычислительные методы исследования молекулярной динамики: учебно-методическое пособие. – СПб.: СПбГУ, 2009 – 50 с.
2. Quantum ESPRESSO [Электронный ресурс] / Home Page. – Режим доступа:<https://www.quantum-espresso.org>, свободный. — Загл. с экрана. – яз. англ.
3. Tsatsoulis. T., Hummel. F., et.al. A comparison between quantum chemistry and quantum Monte Carlo techniques for the adsorption of water on the (001) LiH surface // J. Chem. Phys. 2017. V. 146. P. 204108.

В.П. ЕФРЕМОВ, А.В. УТКИН, Л.Р. ОБРУЧКОВА
Объединённый институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

ГЕНЕРАЦИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕТОВОДОВ

Мы использовали одномерный эксперимент для получения ударных волн в прозрачных диэлектриках - двуокиси кремния. Световоды интенсивно встраиваются в космическую технику благодаря помехо-независимости, весовому совершенству и малому удельному весу. Сегодня световоды делятся на два типа - конденсированные и полые (hollow optical fibers). Материал несущей части большинства световодов - диоксид кремния. Ударные волны изучены в диоксида недостаточно. Мы использовали одномерную интерферометрическую регистрацию процесса удара.

V.P. EFREMOV, A.V. UTKIN, L.R. OBRUCHKOVA
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SHOCK WAVE GENERATION IN TRANSPARENT DIELECTRICS. USING OF FIBERS

We used a one-dimensional experiment to produce shock waves in transparent dielectrics, silicon dioxide. Optical fibers are being intensively integrated into space technology, due to their noise independence, weight perfection and specific low weight. Today, optical fibers are divided into two types: condensed and hollow optical fibers. The material of the bearing part of most optical fibers is silicon dioxide. Shock waves have not been studied sufficiently in dioxide. We used one-dimensional interferometric registration of the impact process.

Локальное нарушение светопроводимости световода приводит к изохорному тепловыделению и генерации тепловых и ударных волн. Для прогнозирования характера распространения ударных волн и вызванного ими разрушения волокна необходимы экспериментальные данные об ударно-волновых свойствах материала. С этой целью в данной работе исследуется ударная сжимаемость кварцевого стекла, используемого в оптических волокнах.

К.В. ХИЩЕНКО

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

МОДЕЛИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССАХ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ

Работа посвящена моделям термодинамики различных материалов в широкой области плотностей и давлений. Рассмотрены зависимости внутренней энергии как функции удельного объема и давления, а также свободной энергии как функции удельного объема и температуры. Приведены примеры построения уравнений состояния некоторых металлов и соединений в ударно-волновых процессах при высоких плотностях энергии.

K.V. KHISHCHENKO

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

MODELS OF EQUATIONS OF STATE FOR MATERIALS IN SHOCK-WAVE PROCESSES AT HIGH ENERGY DENSITIES

The work is devoted to models of thermodynamics for various materials in a wide range of densities and pressures. The dependences of internal energy as a function of specific volume and pressure, as well as free energy as a function of specific volume and temperature are considered. Examples of constructing equations of state for some metals and compounds in shock-wave processes at high energy densities are given.

Изучение поведения материалов при высоких плотностях энергии представляет интерес для развития моделей быстропротекающих процессов с волнами ударного сжатия и изоэнтропического расширения. В таких процессах параметры состояний вещества меняются в широкой области плотностей и давлений. При нагружении в ударной волне вещество сжимается и нагревается, а при изоэнтропической разгрузке — расширяется и охлаждается. Уравнение состояния необходимо для замыкания системы уравнений движения среды во всем диапазоне реализуемых параметров.

В настоящей работе дается краткий обзор моделей уравнений состояния для различных материалов в широкой области изменения термодинамических переменных. В частности рассматриваются зависимости внутренней энергии как функции удельного объема и давления и свободной энергии как функции удельного объема и температуры. Приводятся примеры построения уравнений состояния для ряда металлов (хром, молибден) и соединений (диоксид кремния) при высоких давлениях.

Результаты расчета ударных адиабат и изоэнтроп разгрузки для образцов различной начальной пористости даются в сопоставлении с имеющимися экспериментальными данными. Это сопоставление свидетельствует об адекватности описания термодинамики рассмотренных материалов во всем исследованном диапазоне кинематических и динамических параметров волн сжатия и расширения.

Предложенные модели могут быть эффективно использованы при численном моделировании динамики ударно-волновых процессов при высоких плотностях энергии.

Н.Н. СЕРЕДКИН, К.В. ХИЩЕНКО
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СМЕСИ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ И ПЕРИКЛАЗА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Построены уравнения состояния эпоксидной смолы, периклаза и смеси этих материалов при высоких плотностях энергии, давлениях и температурах. Проведены расчеты ударных адиабат для компонентов и их смеси, расчетные кривые сопоставлены с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов.

N.N. SEREDKIN, K.V. KHISHCHENKO
Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

EQUATION OF STATE OF A MIXTURE OF EPOXY RESIN AND PERICLASE AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES IN SHOCK WAVES

Equations of state for epoxy resin, periclase, and a mixture of these materials at high energy densities, pressures and temperatures are constructed. Calculations of shock adiabats for components and their mixture are carried out, and the calculated curves are compared with available data from shock-wave experiments.

Для проведения численного моделирования процессов в веществе при высоких плотностях энергии необходимо знать уравнение состояния — функциональную взаимосвязь термодинамических параметров исследуемого материала. Уравнение состояния вещества позволяет решить систему уравнений движения (выражающих законы массы, импульса и энергии) [1–3].

В настоящей работе предложена модель термодинамики для смеси эпоксидной смолы и периклаза при высоких давлениях и температурах. С помощью этой модели для указанной смеси и ее компонентов можно проводить численное моделирование высокоэнергетических процессов, в том числе с ударными волнами.

Модель включает в себя калорическое и термическое уравнения состояния компонентов, задаваемые в виде функциональных зависимостей удельной внутренней энергии и давления от удельного объема и температуры. На основе уравнений состояния компонентов и требования механического и теплового равновесия в компонентах получено уравнение состояния смеси. Результаты проведенных расчетов ударных адиабат по уравнениям состояния для компонентов и смеси представлены в сравнении с имеющимися данными по ударному сжатию этих материалов при высоких давлениях и температурах.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
2. Бушман А.В., Ефремов В.П., Ломоносов И.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. // ТВТ. 1990. Т. 28, № 6. С. 1232–1234.
3. Khishchenko K.V. // Energies. 2022. Vol. 15, № 19. P. 7067.

К.А. БОЯРСКИХ, К.В. ХИЩЕНКО

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ТАНТАЛА
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ**

Работа посвящена описанию термодинамических свойств тантала при высоких давлениях и температурах. На основе простых моделей построены уравнения состояния для жидкой фазы этого металла. Проведены расчеты термодинамических параметров вблизи границы области фазового перехода жидкость–пар и на ударных адиабатах образцов различной начальной плотности. Получено хорошее согласие результатов расчетов с опытными данными.

K.A. BOYARSKIKH, K.V. KHISHCHENKO

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

**EQUATION OF STATE FOR THE LIQUID PHASE OF TANTALUM
AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES**

The work is devoted to the description of thermodynamic properties of tantalum at high pressures and temperatures. On the basis of simple models, equations of state for the liquid phase of this metal are constructed. Calculations of thermodynamic parameters near the boundary of the liquid–vapor phase transition region and on shock adiabats of samples with different initial density are performed. Good agreement between the calculation results and experimental data is obtained.

Численное моделирование физических процессов требует знания свойств веществ в широком диапазоне термодинамических параметров. Настоящая работа посвящена описанию свойств тантала. Предложены простые уравнения состояния жидкой фазы рассматриваемого тугоплавкого металла при высоких давлениях и температурах.

Каждая из исследуемых в работе моделей уравнений состояния представлена в виде зависимости свободной энергии от удельного объема и температуры, что является канонической термодинамической формой описания свойств веществ. Отдельно выделены слагаемые свободной энергии, отвечающие за поведение вещества при нулевой абсолютной температуре, а также тепловые вклады электронов и тяжелых частиц. Предложенные полуэмпирические уравнения состояния позволяют описать наблюдаемое в экспериментах качественное поведение вещества вблизи области фазового перехода жидкость – пар, на ударных адиабатах и изоэнтропах разгрузки. Найденные численные значения параметров уравнений состояния обеспечивают количественное согласие с имеющимися опытными данными.

Результаты этого исследования могут быть использованы при численном моделировании физических процессов в жидком тантале при высоких давлениях и температурах. Простота рассмотренных моделей может обеспечить уменьшение расчетного времени по сравнению с более сложными уравнениями состояния.

С.М. ФРОЛОВ^{1,2,3}, В.С. ИВАНОВ^{1,2}, В.С. АКСЕНОВ^{1,3}, И.О. ШАМШИН¹

¹ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, , Москва, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, , Москва, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ РАСПЫЛЕНИЕ СТРУЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ИМПУЛЬСНЫМИ УДАРНЫМИ И ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ

Предложен новый способ получения металлических порошков для аддитивных технологий путем аэродинамического распыления свободно падающей струи расплава поперечными импульсными ударными или детонационными волнами. Импульсные ударные и детонационные волны, используемые для распыления свободно падающих струй расплавов, генерируются импульсно-детонационной пушкой, работающей на стехиометрической смеси жидкого углеводородного горючего и газообразного кислорода. Показано, что минимальный размер частиц получаемых порошков составляет 0,1–1 мкм.

S.M. FROLOV^{1,2,3}, V.S. IVANOV^{1,2}, V.S. AKSENOV^{1,3}, I.O. SHAMSHIN¹

¹ N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

METAL POWDER PRODUCTION BY ATOMIZATION OF FREE-FALLING MELT STREAMS USING PULSED GASEOUS SHOCK AND DETONATION WAVES

A new method for producing metal powders by the atomization of free-falling melt streams using pulsed cross-flow gaseous shock or detonation waves is proposed. Pulsed shock and detonation waves used for the atomization of free-falling melt streams are generated by the pulsed detonation gun operating on the stoichiometric mixture of liquid hydrocarbon fuel and gaseous oxygen. The minimal size of the powders obtained by the method is shown to be as low as 0.1 to 1 μm .

В настоящее время для прототипирования и изготовления различных деталей машин активно развиваются аддитивные технологии, в том числе для печати деталей из конструкционных сталей. Технология печати в таких принтерах обычно основана на послойном спекании металлического порошка с использованием мощного лазерного излучения. Чтобы уменьшить пористость материала, необходимо использовать порошки с минимальным размером частиц, а для получения равномерной усадки деталей после печати необходимо обеспечить форму частиц порошка, близкую к сферической.

В данной работе предложен новый метод получения металлических порошков путем распыления свободно падающих струй расплава импульсными поперечными газовыми ударными или детонационными волнами. В этом методе химическая энергия горючего, используемая для генерации импульсных ударных и детонационных волн, напрямую преобразуется в механическую работу фрагментации струи расплава, что позволяет избежать использования газов высокого давления. Метод позволяет контролировать интенсивность ударной/детонационной волны, а также состав и температуру продуктов детонации путем выбора соответствующих видов горючего и окислителя. Метод реализован на лабораторной и промышленной установках и предварительно опробован на расплавах трех материалов: цинка, алюминиевого сплава AlMg5 и нержавеющей стали AISI 304, обладающих существенно разными свойствами по плотности, поверхностному натяжению и вязкости.

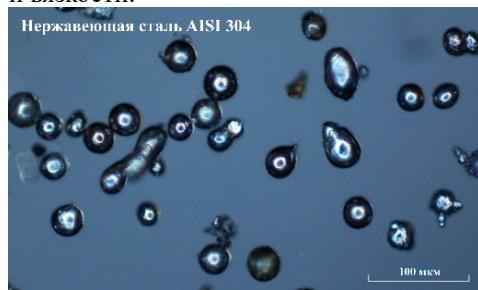


Рис. 1. Результаты микроскопического исследования порошка нержавеющей стали фракции 0–30 мкм.

Показано, что минимальный размер порошков, полученных этим методом, составляет всего 0,1–1 мкм. Массовая доля частиц фракции 0–10 мкм может составлять не менее 20%. Форма частиц самых мелких фракций (0–30 и 30–70 мкм) близка к сферической. Форма частиц более крупных фракций (70–140 мкм и более) становится более нерегулярной. Порошки цинка и алюминия содержат агломераты в виде частиц с мелкодисперсными сателлитами. Мелкие частицы порошка нержавеющей стали имеют идеально сферическую форму и не имеют сателлитов. В целом предварительные эксперименты показывают, что предлагаемый метод получения тонкодисперсных металлических порошков выглядит перспективным с точки зрения характеристик порошка и стоимости.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (государственный контракт № 075-15-2024-543 от 24 апреля 2024 г.).

И.А. САДЫКОВ, А.С. СИЛАНТЬЕВ, В.А. СМЕТАНЮК, С.М. ФРОЛОВ

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

ТЕРМОМЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

Проведены экспериментальные исследования газификации органических отходов животноводства ультраперегретыми водяным паром и диоксидом углерода, полученными импульсной детонацией смеси природный газ – кислород. Определены фазовый и химический составы продуктов газификации отходов и зольного остатка.

I.A. SADYKOV, A.S. SILANTIEV, V.A. SMETANYUK, S.M. FROLOV

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

THERMOMECHANOCHEMICAL GASIFICATION OF LIVESTOCK WASTE

The results of experiments on the gasification of organic livestock waste by ultra-superheated steam and carbon dioxide obtained by pulsed detonations of a natural gas – oxygen mixture are reported. The phase and chemical compositions of the dry-off gas and ash residues are determined.

Нами предложена и в течение нескольких лет развивается новая технология газификации органических отходов ультраперегретым газифицирующим агентом (ГА) – смесью водяного пара и диоксида углерода с температурой выше 2000 °C. Такой ГА получается с помощью детонационной пушки, в которой организовано импульсно-детонационное сжигание кислородной смеси природного газа. В предыдущих работах демонстрировалась возможность газификации различных твердых (опилки, кофейных жмых, лигнин) и жидкых (отработанное машинное масло, нефешлам) органических отходов. Экспериментальная установка состоит из детонационной пушки, проточного реактора, а также систем очистки и сжигания получаемого газа. Детонационная пушка работает на смеси природного газа и кислорода околостехиометрического состава и воздействует на отходы в проточном реакторе сильными ударными волнами и высокоскоростными струями продуктов детонации с образованием газа, в основном состоящего из монооксида углерода и водорода, а также углекислого газа и метана.

Отходы, используемые в работе, представляют собой подстилочный свиной навоз влажностью $\alpha=70\%$. Исследования проведены как с исходными отходами, так и с подсушенными до влажности $\alpha=45\%$ и 15% . Отходы загружаются в реактор как порционно перед началом эксперимента, так и непрерывно с помощью специального питателя. Типичный состав сухого газа, получаемого из исходного влажного ($\alpha=70\%$) сырья (рис. 1): 33–41 об.% CO₂, 34–40 об.% CO, 17–22 об.% H₂, 2,5–4,0 об.% CH₄ и 0–2,5 об.% CxHy. Темплота сгорания такого газа составляет 8–10 МДж/кг. Снижением влажности сырья можно повысить выходы CO, H₂ и CH₄ до 45%, 25% и 5% соответственно и понизить выход CO₂ до 25%. т.е. получаемый сухой газ может содержать до 75% горючего газа с теплотворной способностью 10–12 МДж/кг. Проведены элементный и гранулометрический анализ зольного остатка. Показано, что влажное сырье претерпевает более глубокую конверсию, чем подсушенное, что связано с постепенным и послойным вовлечением влажного сырья в процесс газификации. Частицы зольного остатка имеют размер от 0,5 мкм до 12 мкм.

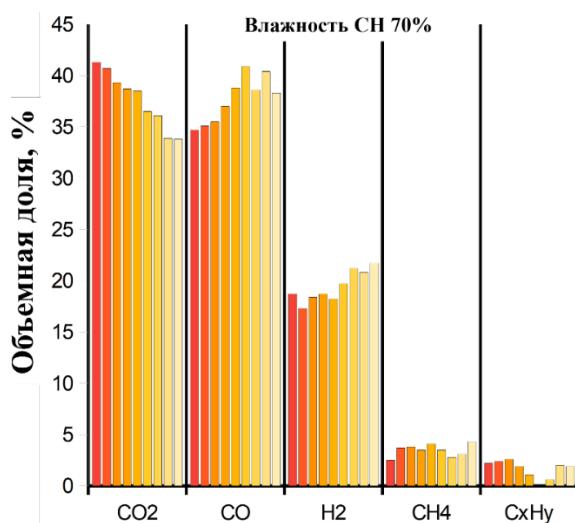


Рис. 1. Составы сухих газообразных продуктов газификации свиного навоза с исходной влажностью 70% при порционной загрузке сырья в реактор и различных условиях газификации.

А.Р. АХУНЬЯНОВ¹, П.А. ВЛАСОВ^{1,2}, В.Н. СМИРНОВ¹, В.С АРУТЮНОВ^{1,3}, Ю.А. КРОВЯКОВА²

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия.

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия.

³ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Москва, Россия.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК Н₂ И СО НА ПРОЦЕСС САЖЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПИРОЛИЗЕ И ОКИСЛЕНИИ ЭТИЛЕНА В ОТРАЖЕННЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Проведено прямое сравнение результатов экспериментов в ударной трубе с результатами кинетических расчетов процесса сажеобразования по разработанной кинетической модели сажеобразования.

A.R. AKHUNYANOV¹, P.A. VLASOV^{1,2}, V.N. SMIRNOV¹, V.S. ARUTYUNOV^{1,3}, Y.A. KROVYAKOVA²

¹N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

THE EFFECT OF H₂ AND CO ADDITIVES ON THE SOOT FORMATION PROCESS DURING PYROLYSIS AND OXIDATION OF ETHYLENE IN REFLECTED SHOCK WAVES

A direct comparison of the experimental results in the impact tube with the results of kinetic calculations of the soot formation process according to the developed kinetic model of soot formation is carried out.

Сажеобразование – это сложный многостадийный процесс, который играет ключевую роль во многих технологических процессах, включая сжигание топлива, производство технического углерода и работу реактивных и турбулентных двигателей. В современном мире химическая промышленность играет ключевую роль в производстве широкого спектра материалов. Одним из важнейших процессов в этой сфере является пиролиз углеводородного сырья, в частности, этилена, который является базовым мономером для производства полимеров и других ценных химических продуктов. Так как сажа является продуктом неполного сгорания углеводородов, то ее образование приводит к снижению эффективности сгорания.

В рамках данной работы будет проведено исследование добавления водорода (Н₂) и угарного газа (СО) при пиролизе и окислении этилена в отраженных ударных волнах. Данный метод позволяет изучать процессы, протекающие в условиях высоких температур и давлений, что приближено к реальным условиям промышленного пиролиза. Целью работы является выявление влияния этих добавок на конверсию этилена и состав продуктов пиролиза, что позволит получить ценную информацию для оптимизации процесса.

Исследование показывает, что добавление водорода к смеси этилена и аргона как в случае пиролиза так и в случае окисипиролиза существенно снижает выход сажи. Это происходит не за счет изменения механизмов образования и роста частиц сажи, а за счет уменьшения количества предшественников и ядер конденсации сажи. Водород участвует в химических реакциях, которые влияют на образование зародышей сажи, тем самым снижая общую концентрацию сажи.

П.О. ВИНОГРАДОВ, Ю.А. БОГДАНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТР-ЗАДАЧИ И РАСЧЕТА РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

В данной работе разработан программный код на языке Python для расчета равновесного состава продуктов химической реакции быстропротекающих процессов. Основой метода является поиск экстремума характеристических функций, что позволяет определить распределение компонентов в системе при двух заданных термодинамических параметрах. Алгоритм разработан с использованием уравнения состояния идеального газа и обеспечивает численное решение системы нелинейных уравнений, описывающих химическое равновесие. Полученная методика предоставляет возможность анализа химических реакций различной сложности и может быть использована для научных и инженерных задач в области термодинамики и химической кинетики.

P.O. VINOGRADOV, Y.A. BOGDANOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE CODE FOR SOLVING TP-PROBLEM AND CALCULATING THE EQUILIBRIUM COMPOSITION OF REACTION PRODUCTS USING THE IDEAL GAS EQUATION OF STATE

This work presents the development of Python-based software for calculating the equilibrium composition of chemical reaction products. The method is based on finding the extremum of characteristic functions, enabling the determination of the component distribution in the system under given thermodynamic conditions. The algorithm incorporates the ideal gas equation of state and solves a system of nonlinear equations numerically to describe the equilibrium. The resulting method facilitates the analysis of chemical reactions of varying complexity and can be utilized for scientific and engineering applications in thermodynamics and chemical kinetics.

В настоящее время термодинамические расчеты равновесных состояний активно используются в различных научных и технических областях. Один из основных подходов к расчету химического равновесия основан на поиске экстремума характеристических функций. С использованием метода Лагранжа задача поиска условного экстремума преобразуется в задачу определения безусловного экстремума. Такой подход позволяет получить решение более компактным способом, сохраняя при этом математическую точность и логическую стройность.

В работе представлена методика решения нелинейных систем для данной задачи и разработан соответствующий компьютерный алгоритм. В основе кода лежат символьные вычисления, как наиболее удобный способ записи уравнений.

Работа была проведена в два этапа: первый этап – разработка алгоритма для расчета равновесного состава бинарных смесей, второй этап – расширение функционала кода для расчета равновесного состава сложных многокомпонентных химических систем [1]. В обоих этапах рассматривались только газообразные продукты. В качестве калорического уравнения состояния использовались полиномиальные зависимости базы данных ИВТАНТЕРМО [2] и JANAF [3].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

Список литературы

1. Губин С.А., Одинцов В.В., Пепекин В.И. Термодинамические расчеты сложных химических систем. Учебное пособие. - М.: МИФИ, 1987. -96 с.
2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. /Л. В. Гурвич, и. В. Вейц, В. А. Медведев и др. -- 3-е изд., перераб. и расширен. - Т. I Ки. 1. - М.: Наука, 1978. - 496 с.
3. JANAF thermochemical Tables. - 2nd ed., U.S. Dept of Commerce, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1970.

Т.К. КИРГИЗОВ, Ю.А. БОГДАНОВА, И.В. МАКЛАШОВА
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАЛОРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ

Рассмотрены особенности использования калорических уравнений состояния при моделировании термодинамических свойств веществ в условиях высоких температур и давлений. Проведено исследование влияния неидеальности газовой фазы на расчет параметров химических систем. Разработаны методики и компьютерные алгоритмы для автоматизированного анализа данных, позволяющие рассчитывать термодинамические свойства веществ на основе баз данных JANAF и ИВТАНТЕРМО. Методом итерационного деления определены температуры, при которых энергия ударной волны остается постоянной, что позволяет получать параметры газа за фронтом ударной волны.

T.K. KIRGIZOV, Y.A. BOGDANOVA, I.V. MAKLASHOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF SUBSTANCES USING CALORIC EQUATIONS OF STATE

Considered the features of using caloric equations of state in modeling thermodynamic properties of substances at high temperatures and pressures. The influence of imperfections in the gas phase on the calculation of parameters of chemical systems is studied. Software tools have been developed for automated data analysis to calculate the thermodynamic properties of substances using the JANAF and IVTANTHERMO databases. An iterative division method is used to determine the temperatures at which the energy of a shock wave remains constant, allowing us to obtain the properties of the gas behind a shock wave front.

Калорические уравнения состояния являются неотъемлемой частью термодинамического моделирования для определения равновесного состава продуктов химических реакций. Термодинамический расчет неидеальных систем проводится в предположении, что вклад внутренних степеней свободы атомов и молекул в неидеальном состоянии остается таким же, как в идеальном состоянии при той же температуре [1].

Разработаны методики и компьютерные алгоритмы для парсинга, обработки и анализа калорических зависимостей на основе баз данных JANAF и ИВТАНТЕРМО, реализованные на C++ и Python. Представленные алгоритмы позволяют с высокой точностью производить расчеты термодинамических свойств веществ при высоких температурах: энталпию, энтропию и изобарную теплоемкость. Проведен сравнительный анализ рассчитанных величин на основе используемых баз данных. Результаты расчетов энергетических характеристик веществ в зависимости от температуры представлены на рис. 1, которые могут использоваться для начальной оценки термодинамических свойств веществ и дальнейшего расчета равновесного состава продуктов химических реакций.

С использованием полученных данных успешно применен итерационный метод бисекции для решения задач определения температуры за фронтом ударной волны, что позволило уточнить характеристики газа в данных условиях.

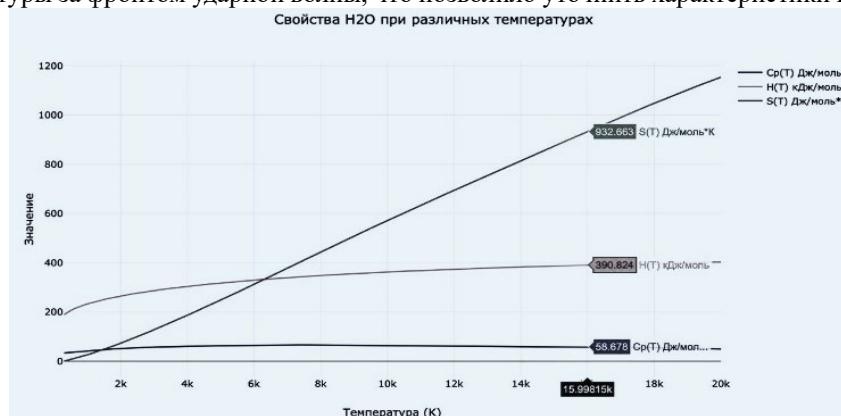


Рис. 1. График зависимости термодинамических свойств H₂O от температуры

Работа позволяет повысить точность моделирования быстропротекающих процессов, включая ударные волны, что особенно важно для решения научных и прикладных задач в физике высоких плотностей энергии. Полученные данные и разработанные программы могут быть использованы в дальнейшем для термодинамического моделирования сложных химических систем.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

Список литературы

- Губин С.А., Одинцов В.В., Пепекин В.И. «Термодинамические расчеты сложных химических систем». Учебное пособие. - М.: МИФИ, 1987 96с.

Ф.С. СЕТАБЛАЕВ, И.В. МАКЛАШОВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ БОРА

В работе были определены оптимальные уравнения для описания холодной компоненты в уравнении состояния Ми-Грюнайзена, а также были сравнены разные подходы к вычислению изохорной теплоемкости (тепловой компоненты). Для поиска оптимального подхода были рассмотрены разные способы расчета теплоемкости, оценены их преимущества и недостатки.

F.S. SETABLAEV, I.V.MAKLASHOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE BORON EQUATION OF STATE

The optimal equations for describing the cold component in the Mie-Gruneisen equation of state were determined, and different approaches to calculating of specific heat capacity (the thermal component) were compared. To find the optimal approach to the thermal component, different methods of calculating the heat capacity were considered, their advantages and disadvantages were evaluated.

Элементарный бор — элемент захватывающей сложности. Находясь в периодической таблице на границе между металлами и неметаллами, бор принадлежит к 13-й группе вместе с алюминием, галлием, индием и таллием. Все элементы этой группы имеют три валентных электрона, которые обычно благоприятствуют металличности. Бор является исключением: его три валентных электрона достаточно локализованы, чтобы сделать его неметаллическим. Эта « frustra » объясняет, почему бор демонстрирует уникальные кристаллические структуры, во всех из которых доминирует икосаэдрический кластер B12. Эти икосаэдры могут быть связаны между собой сильными ковалентными связями различными способами, образуя несколько полиморфов [1]. В литературе упоминается не менее 16 полиморфов бора. Существует четырех кристаллических модификаций, соответствующих чистому элементу. Это: α-ромбоэдрический B12 (α B12, 12 атомов, т.е. один икосаэдр в элементарной ячейке), β-ромбоэдрический B105 (105 атомов в элементарной ячейке), тетрагональный t-B192 (192 атома/ ячейка) и форма высокого давления γB28 (28 атомов в орторомбической элементарной ячейке). Последняя, первоначально синтезированная при высоком давлении и температуре в 1965 году [2], была совсем недавно повторно синтезирована Огановым и др. [3], и ее неизвестная структура была решена с помощью ab initio расчетов в рамках эволюционного алгоритма USPEX [4]. Позднее γB28 также изучался Заречной и др. [5, 6], которым удалось синтезировать несколько микроразмерных монокристаллов этой фазы. Фаза γ-B28 оказалась ключом к пониманию фазовой диаграммы бора, единственного легкого элемента, стабильность фаз которого оставалась неизвестной до самого недавнего времени.

Таким образом, целью данной работы является прогнозирование и анализ свойств Бора γ-B28. Для начала необходимо выбрать уравнение для холодной части в уравнении состояния Ми-Грюнайзена. Для твердых тел используют уравнения состояния Мурнагана и Берча-Мурнагана 3-го порядка. Далее для тепловой части рассматривалось несколько моделей при разных возможных подходах к теплоемкости: Подход Эйнштейна, приближение по Закону Дилюнга-Пти, полиномиальная зависимость, модель Дебая, регрессия с численным методом оптимизации 1-го порядка (Градиентный спуск).

Список литературы

1. Albert, B. and Hillebrecht, H., Boron: Elementary Challenge for Experimenters and Theoreticians, *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, vol. 48, no. 46, pp. 8640–8668.
2. Wentorf, R.H., Boron—Another Form, *Science*, 1965, vol. 147, no. 3653, pp. 49–50.
3. Oganov, A.R., Chen, J.H., Gatti,C., et al., Ionic HighPressure Form of Elemental Boron, *Nature*, 2009, vol. 457, no. 7231, pp. 863–867.
4. Oganov, A.R. and Glass, C.W., Crystal Structure Prediction Using ab initio Evolutionary Techniques: Principles and Applications, *J. Chemical Physics*, 2006, vol. 124, art. 244704.
5. Zarechnaya, E.Y., Dubrovinsky, L., Dubrovinskaia, N., et al., Superhard Semiconducting Optically Transparent High Pressure Phase of Boron, *Phys. Rev. Lett.*, 2009, vol. 102, art. 185501.
6. Zarechnaya, E.Y., Dubrovinsky, L., Dubrovinskaia, N., et al., Synthesis of an Orthorhombic High Pressure Boron Phase, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, 2008, vol. 9, art. 044209.

Т.В. ФЕДОСЕЕВ^{1,2}, Т.В. БОГДАН^{1,3}, С.Э. БОГОРОДСКИЙ^{1,3}, В.И.БОГДАН^{1,3}

¹ Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В .Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕХОДА СМЕСИ ВОДЫ И ЭТАНОЛА В СВЕРХКРИТИЧЕСКУЮ ОБЛАСТЬ: СОГЛАСИЕ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследована смесь вода-этанол с целью определения параметров перехода в сверхкритическое состояние. Экспериментальное определение основано на том, что в сверхкритическом состоянии плотность среды меняется без резких скачков, которые характерны для фазового перехода первого рода. Получено, что для смеси концентрации 0.55 м.д. этанола переход в сверхкритическое состояние происходит при температуре выше 570 К и давлении 12 МПа. Расчет критических параметров по уравнению состояния Пенга-Робинсона согласуется с экспериментальными данными:

T.V. FEDOSEEV^{1,2}, T.V. BOGDAN^{1,3}, S.E. BOGORODSKIY^{1,3}, V.I. BOGDAN^{1,3}

¹Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³Moscow State University named after M.V.Lomonosova, Faculty of Chemistry, Moscow, Russia

PARAMETERS OF THE TRANSITION OF A MIXTURE OF WATER AND ETHANOL TO THE SUPERCritical REGION: AGREEMENT OF CALCULATION AND EXPERIMENT

A water-ethanol mixture was studied in order to determine the parameters of the transition to a supercritical state. The experimental definition is based on the fact that in a supercritical state, the density of the medium changes without sudden jumps, which are characteristic of a phase transition of the first kind. It was found that for a mixture with a concentration of 0.55 ppm of ethanol, the transition to a supercritical state occurs at a temperature above 570 K and a pressure of 12 MPa. The calculation of critical parameters using the Peng-Robinson equation of state is consistent with experimental data.:

Использование сверхкритических флюидов в качестве растворителей или экстрагентов позволяет использовать преимущества состояния вещества в сверхкритическом состоянии, сочетающим в себе преимущества газовой и жидкой фаз: отсутствие диффузионных ограничений при смешивании реагентов, неограниченная растворимость компонентов [1]. Критические параметры для воды и спиртов известны (воды $T_{kp} = 647$ К, $p_{kp} = 22$ МПа; этанола $T_{kp} = 516$ К, $p_{kp} = 6.3$ МПа [2], однако для водно-спиртовых смесей область перехода в сверхкритическое состояние не определена. Таким образом, для практических использований водно-этанольных смесей необходимо определить параметры их перехода в сверхкритическую область.

В данной работе экспериментально определяли область перехода водно-этанольной смеси (0.55 м.д. этанола) в сверхкритическое состояние. Экспериментальная методика определения критических параметров основана на резком изменении плотности при переходе в сверхкритические условия. Экспериментальная кривая для давления 12 МПа носит плавный монотонный характер, что свидетельствует о фазовом переходе второго рода. Расчеты по уравнению Пенга-Робинсона [3] дают близкие результаты (рис. 1). Для расчетов использовали программный пакет COCO - simulator.

Таким образом, переход в сверхкритическое состояние для водно-этанольной смеси (0.55 м.д. этанола) происходит при давлении выше 12 МПа и температуре выше 570 К.

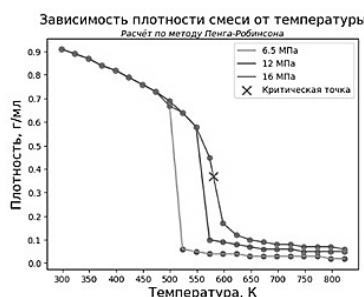


Рис. 1. Экспериментальная и расчетные кривые плотности смеси воды и этанола (0.55 м.д.).

Список литературы

1. Е.С. Алексеев, А.Ю. Алентьев, И.А. Бажанов, А.С. Белова, и др.. Сверхкритические флюиды в химии // Успехи химии. 2020. Т. 89. С. 1337-1427.
2. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 102nd Ed. / ed. Rumble J.R. Boca Raton, FL: CRC Press, 2021.
3. D.Y. Peng, D. B. Robinson. A New Two-Constant Equation of State // Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals. 1976. Vol. 15. P. 59-64.

Н.В. АПАЛЬКОВ, И.В. МАКЛАШОВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАСЧЁТ УДАРНОГО СЖАТИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе на основе уравнения состояния Ми-Грюнайзена предложен алгоритм для расчета ударной адиабаты пористых материалов. Определены параметры уравнения состояния веществ, достоверно описывающие свойства сплошных и пористых материалов в заданном диапазоне давлений и пористостей, которые используются и для расчета ударных адиабат пористых веществ и смесей. Полученные расчетные результаты хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

N.V. APAL'KOV, I.V. MAKLASHOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CALCULATION OF SHOCK COMPRESSION OF POROUS MATERIALS

Based on the Mie-Grüneisen equation of state, an algorithm is proposed for calculating the shock adiabat of porous materials. The parameters of the equation of state of substances are determined, reliably describing the properties of solid and porous materials in a given range of pressures and porosities, which are also used to calculate the shock adiabats of porous substances and mixtures. The obtained calculation results are in good agreement with the available experimental data.

Моделирование поведения различных сред под воздействием внешних интенсивных сил имеет большое значение для многих прикладных областей науки. Пористые металлы являются перспективными материалами, так как при низкой плотности могут поглощать большое количество энергии в процессе нагружения при относительно низкой степени сжатия. Повышенный разогрев пористого вещества оказывает прямое влияние на его ударную адиабату [1]. Когда пористость вещества мала, его ударная адиабата в координатах давление – удельный объем будет тем выше отклоняться от адиабаты сплошного вещества, чем больше его пористость. При высоком значении пористости вещества ударная адиабата может принимать аномальный вид, при котором большему давлению будут соответствовать большие удельные объемы [2].

Ударная адиабата рассчитывалась при помощи уравнения Гюгонио, посредством которого каждая последующая точка на расчетной кривой связана с начальной, обозначенной индексом «0». Чтобы получить точку на ударной адиабате, проводились расчеты итерационного подбора температуры так, чтобы функция H_g стала равна нулю с заданной точностью с учетом калорического и термического уравнений состояния (УРС) $H_g = E(P, V) - E_0(P_0, V_0) - \frac{1}{2}(P + P_0)(V_0 - V) = 0$. В этой работе при построении УРС для описания свойств конденсированного вещества используется уравнение типа Ми – Грюнайзена. Для расчета ударных адиабат пористых веществ V_0 в уравнении Гюгонио заменяется на $V_{00} = 1/\rho_{00} = m \cdot V_0$, где ρ_{00} — начальная плотность пористого материала, а m — отношение плотности сплошного образца к плотности пористого образца, т.е. пористость вещества. В этой работе рассмотрен только небольшие значения пористости вещества $m < 2$. Для расчета свойств вещества с высокой пористостью лучше применять гетерогенную модель, включающую в себя компоненты конденсированного вещества и воздуха. Полученные расчетные значения параметров ударно-волнового сжатия металлов хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными [3].

Список литературы

1. Медведев А.Б., Трунин Р.Ф. Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 8. С. 829–846.
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1996. 688 с.
3. Электронный ресурс — база ударно-волновых данных <http://www.ihed.ras.ru/tusbank/>

Секция

Электрофизическое и ядерное приборостроение

Руководитель секции – Юрков Дмитрий Игоревич д.т.н., и.о. директора ИФТИС НИЯУ МИФИ

Секретарь секции – Масленников Сергей Павлович д.т.н., профессор кафедры 24

Тел./факс: 8 (495) 788-56-99, доб. 9796
E-mail: SPMaslennikov@mephi.ru

А.И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, Е.В. РЯБЕВА, А.П. ДЕНИСЕНКО, В.А. КУГАВДА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ДОЗИМЕТР НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА С РЕГИСТРАЦИЕЙ СВЕТА ПОСРЕДСТВОМ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Предложена конструкция и рассмотрены основные результаты, полученные при помощи разрабатываемого дозиметра нейтронного излучения на основе сцинтиллятора $ZnS(Ag)+^6LiF$ с регистрацией света посредством кремниевых фотоумножителей. Диапазон энергий регистрируемых нейтронов от 0,025 эВ до 14 МэВ, диапазон мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения $1 \cdot 10^{-7} - 1 \text{ Зв/ч}$, диапазон плотности потока нейтронного излучения $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^6 \text{ н/(с} \cdot \text{см}^2)$.

A.I. ARKHANGELSKIY, E.V. RYABEVA, A.P. DENISENKO, V.A. KUGAVDA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

NEUTRON RADIATION DOSIMETER BASED ON A SCINTILLATION DETECTOR WITH LIGHT DETECTION USING SILICON PHOTOMULTIPLIERS

The design and main results obtained with under development neutron radiation dosimeter based on a $ZnS(Ag)+^6LiF$ scintillator with light detection using silicon photomultipliers are considered. The main dosimeter parameters are: the energy range of detected neutrons from 0.025 eV to 14 MeV, the range of ambient neutron radiation dose equivalent rate $1 \cdot 10^{-7} - 1 \text{ Sv/h}$ and the range of neutron radiation flux density $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^6 \text{ n/(s} \cdot \text{cm}^2)$.

В соответствии с Нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009 [1], нормируемой величиной в дозиметрии является эффективная доза. При контроле радиационной обстановки, для оценки значений эффективной дозы используются операционные величины - амбиентный эквивалент дозы (АЭД) и мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД), которые относятся к дозиметрическим характеристикам рабочего места и не привязаны к конкретному человеку. В описываемом дозиметре используется принцип подобия энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ) дозиметра и дозовой кривой. Конструкция дозиметра выбрана таким образом, чтобы его ЭЗЧ имела такую же форму, как и дозовая кривая. При этом нет необходимости в измерении спектра нейтронов, так как подобие зависимостей позволяет подобрать коэффициент, который при умножении на отклик дозиметра даст МАЭД (АЭД). Прибор представляет собой моноблок, включающий сферический замедлитель и блок электроники (БЭ). Замедлитель состоит из внешней и внутренней полиэтиленовых сфер. Внешняя сфера имеет диаметр Ø214 мм, внутренняя сфера Ø142 мм покрыта снаружи слоем Cd толщиной 1 мм и имеет цилиндрическое отверстие Ø35 мм для размещения БЭ с установленными регистрирующими тепловыми нейтроны элементами (РЭ). Для увеличения максимальной загрузки детектора, в данной версии дозиметра используется шесть РЭ. Каждый РЭ представляет собой световод в виде цилиндра из ПММА Ø25×8 мм, с приклешенным на торцах сцинтиллятором $ZnS(Ag)+^6LiF$ толщиной 0.5 мм, обернутый светоотражателем TYVEC. Регистрация светового потока в каждом РЭ осуществляется с помощью кремниевого фотоумножителя (SiPM) OnSemi MicroFC-60035-SMT, прикрепленного к боковой поверхности световода. При этом используются сигналы, как с "медленного", так и с "быстрого" выхода SiPM. Внешний вид разработанного варианта прибора представлен на рис. 1. На рис. 2 приведен результат калибровки, полученный при одновременном измерении МАЭД по показаниям дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М и скорости счета описываемого дозиметра при различных расстояниях между источником нейтронов AmBe и приборами и соответствующих этим расстояниям различных МАЭД.

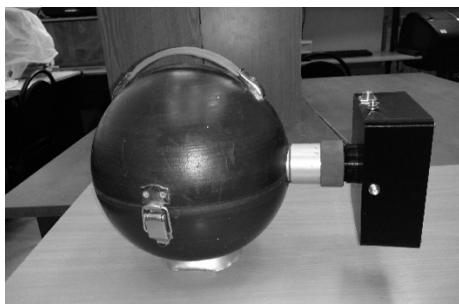


Рис. 1. Внешний вид разработанного варианта прибора

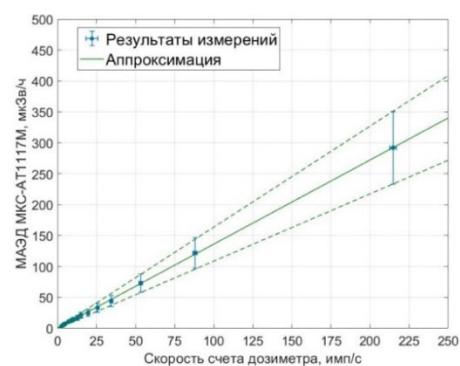


Рис. 2. Калибровка прибора по показаниям МКС-АТ1117М

Список литературы

1. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

С.В. ГАВРИШ, А.О. ПОТАПЕНКО, П.А. ЧИЛИКИНА, С.Г. ШАШКОВСКИЙ
Научно – производственное предприятие «Мелитта», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ–ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ

В работе рассматриваются способы повышения энергии излучения импульсного ксенонового разряда в спектральном диапазоне короче 250 нм. Выполненный расчет яркостной температуры разряда показал необходимость повышения температуры до 20000К. Приводятся результаты исследования импульсных короткодуговых и капиллярных ламп с разрядом в ксеноне, показавших возможность достижения требуемой величины яркостной температуры.

S.V. GAVRISH, A.O. POTAPENKO, P.A. CHILIKINA, S.G. SHASHKOVSKIY
Scientific and Industrial Enterprise "Melitta", Ltd

DEVELOPMENT OF HIGH-BRIGHTNESS PULSED UV RADIATION SOURCES

The paper considers ways to increase the radiation energy of a pulsed xenon discharge in the spectral range shorter than 250 nm. The performed calculation of the brightness temperature of the discharge showed the need to increase the temperature to 20,000 K. The results of a study of pulsed short-arc and capillary lamps with a discharge in xenon are presented, showing the possibility of achieving the required brightness temperature.

Вопросы повышения эффективности генерации УФ-излучения импульсным ксеноновым разрядом давно рассматриваются применительно к трубчатым газоразрядным лампам [1], в которых при разряде короткой длительности можно достичь яркостных температур $T_y = 7500 - 8500\text{K}$ с максимумом мощности излучения в диапазоне длин волн 240–300 нм. Современные тенденции развития науки, медицины и микроэлектроники ставят задачу сдвига максимума яркости в сторону жесткого ультрафиолета (диапазон УФ-С).

В настоящей работе приводятся результаты исследований, направленных на решение данной задачи. Исследования проводились в три этапа. Вначале на основе закона смещения Вина выполнена оценка яркостной температуры, при которой максимум излучения абсолютно черного тела (АЧТ) находится в диапазоне 200 – 250 нм. Расчеты показали, что для решения такой задачи необходимо получить температуру разряда выше 16500К (рис. 1, а).

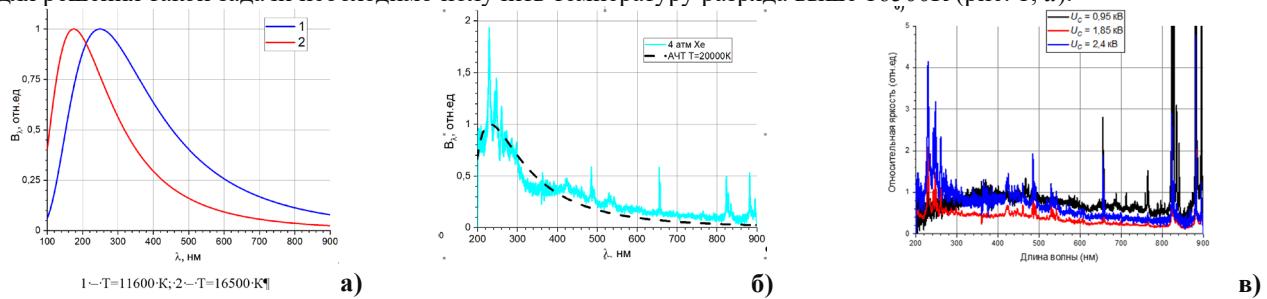


Рис. 1 Спектральное распределение яркости АЧТ (а), короткодуговой (б) и капиллярной ламп (в).

Указанную T_y можно обеспечить для малого межэлектродного промежутка (4-6 мм) при сверхвысоком давлении (СВД) ксенона или применением капилляра [1]. На втором этапе при разработке короткодуговых ламп СВД изучено влияние на яркость излучения энергии разряда от 0,25 до 1,5 Дж и давления ксенона в диапазоне 2-6 атм. Для снижения энергетических потерь в разрядном контуре применялась конструкция лампы с встроенным электродом зажигания. В результате экспериментов удалось получить спектральное распределение излучения лампы, приближающееся к спектру АЧТ при $T_y = 20000\text{K}$ (рис.1, б). Наибольшая эффективность генерации излучения в диапазоне УФ-С наблюдалась при давлениях ксенона 4 атм., которая достигала значений 12% от вложенной в разряд энергии. Для импульсных капиллярных ламп с диаметром плазменного канала 3 мм изучены спектральное распределение T_y и энергия излучения ксеноновой плазмы при переменной энергии разряда от 4 до 26 Дж и давлении ксенона 220 и 350 Торр. В результате выполненных исследований достигнута максимальная яркостная температура 13500К (рис.1, в). Установлено, что при увеличении электрической энергии происходит рост эффективности генерации УФ-излучения, например, нами достигнут КПД равный 10% при энергии разряда 26 Дж. В то же время в работе [1] показано, что увеличить яркостную температуру возможно уменьшением диаметра капилляра до 1 мм или еще меньше. В таких условиях будет расти температура оболочки и, как следствие, произойдет сдвиг УФ- границы пропускания колбы в сторону видимой области, и усиится эрозия кварцевой трубки. Устранить этот недостаток возможно применением сапфира в качестве материала оболочки, у которого температура кипения на 1000К выше, чем у кварцевого стекла. В этом направлении сейчас нами ведутся исследования.

В работе подробно описаны конструкции экспериментальных ламп, приведены схемы электрического питания, методики исследования электрических параметров и характеристик УФ-излучения.

Список литературы

1. И.С. Маршак, А.С. Дойников и др. Импульсные источники света. М.: Энергия, 1978. – 472 с.

А.В. ЗИНОВЬЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕТОД АНАЛИЗА ОТКАЗОВ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Проведен анализ механизмов отказов и причин растрескивания керамических конденсаторов, представлены результаты исследования электрофизических характеристик конденсаторов с различным типом керамики в зависимости от воздействия электрических и тепловых нагрузок, ионизирующего излучения. По результатам проведенных исследований выданы рекомендации по применению керамических конденсаторов.

A.V. ZINOVEV

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

APPLICATION ISSUES AND FAILURE ANALYSIS METHOD OF CERAMIC CAPACITORS

The failure mechanisms and causes of cracking of ceramic capacitors have been analyzed, and the results of a study of the electrophysical characteristics of capacitors with different types of ceramics, depending on the effects of electrical and thermal loads and radiation, have been presented. Based on the results of the conducted research, recommendations have been issued for the use of ceramic capacitors.

Многослойные керамические конденсаторы составляют большую часть пассивных компонентов, применяемых в электронной аппаратуре [1]. По статистике до 30% отказов аппаратуры происходит по причине емкостных накопителей, и примерно половина из этих отказов связана с растрескиванием конденсаторов [2]. Отказы керамических конденсаторов с трещинами при воздействии увлажнения, механических, температурных и электрических нагрузок объясняют сорбцией влаги, увеличивающей проводимость по поверхности трещины, либо электрохимической миграцией электродных материалов и образованием замыкающих металлических дендритов. В настоящее время доля производственных дефектов существенно сократилась, и большинство проблем с керамическими конденсаторами связано с последующими нагрузками при сборке и испытаниях аппаратуры [3]. В 2022 году производитель керамических конденсаторов типа K10-67 АО «НИИ «Гириконд» в качестве диэлектрика стал использовать бессвинцовую керамику на основе титаната бария в связи с ее технологичностью и экологичностью вместо керамики на основе оксида ниобия, однако эксплуатационные характеристики конденсаторов в технической документации не изменились. Изменение химического состава керамического диэлектрика могло повлиять на электрические параметры при воздействии тепловых и электрических нагрузок и стойкость к воздействию ионизирующего излучения, что может являться критичным для работы аппаратуры в целом. Поэтому целью данной работы является разработка метода анализа отказов и выдача рекомендаций по применению керамических конденсаторов на основе комплексных исследований электрофизических характеристик и факторов, влияющих на их отказ.

По результатам проведенных исследований установлено, что температура Кюри конденсаторов из керамики на основе титаната бария смещена в область комнатной температуры, а для конденсаторов из керамики на основе оксида ниобия определяется при температуре ≈ 75 °C. После температуры Кюри происходит фазовый переход, характерный для сегнетоэлектриков: сегнетоэлектрик переходит в паразелектрическую фазу, что сопровождается также уменьшением потерь, связанных с переориентацией доменов. В области отрицательных температур фактор потерь имеет максимальные значения вследствие увеличения диэлектрических потерь на поляризацию. Конденсаторам из керамического материала на основе оксида ниобия при отрицательных температурах нужно больше времени для ориентации доменов в направление электрического поля. Это связано с тем, что в керамических материалах присутствует спонтанная (доменная) поляризация. Установлено, что зависимости удельной проводимости имеют два характерных участка, разделенных изломом. Излом температурной зависимости удельной проводимости у конденсаторов из керамики на основе оксида ниобия наступает при температуре ≈ 75 °C, а у конденсаторов из керамики на основе титаната бария – при температуре более 100 °C. Также стоит отметить, что керамические конденсаторы из бессвинцовой керамики на основе титаната бария обладают гораздо меньшим уровнем стойкости к воздействию импульсного ионизирующего излучения, чем конденсаторы из керамики на основе оксида ниобия, содержащей свинец. По результатам проведенных исследований разработан метод анализа отказов керамических конденсаторов, заключающийся в оценке электрических параметров, техническом осмотре внешнего вида и внутренних слоев, анализе технологических воздействий и режимов эксплуатации.

Список литературы

- Pan M-J. A brief introduction to ceramic capacitors. // IEEE electrical insulation magazine. 2010. Vol. 26. No. 3. p. 44-50.
- Zogbi D.M. Electronic components for the defense & aerospace sector: world markets, technologies and opportunities: 2017-2022. Paumanok Publications, Inc. 2018.
- Herzberger J., Teverovsky A. Dendrite growth in PME and BME ceramic capacitors. //CARTS Int., Houston, TX. 2013. p.3.3 1-25.

Р.Ф. ИБРАГИМОВ, А.П. ДЕНИСЕНКО, М.Ю. МИШИН, Е.В. РЯБЕВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ПРИБОРА ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ АКТИВАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Разработан и создан экспериментальный образец прибора для измерения выхода нейтронов импульсных источников активационным методом. Параметры конструкции прибора оптимизированы. Приведены результаты измерения выходов импульсных генераторов нейтронов на основе камер плазменного фокуса сдейтериевым и тритиевым наполнением. Также приведены результаты измерения потоков нейтронов изотопных источников (AmBe, PuBe) и квазистационарных генераторов нейтронов на примере ИНГ-07Т.

R.F. IBRAGIMOV, A.P. DENISENKO, M.Y. MISHIN, E.V. RYABEVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE EXPERIMENTAL SAMPLE OF A DEVICE FOR MEASURING THE NEUTRON OUTPUT OF PULSED SOURCES BY THE ACTIVATION METHOD

The experimental sample of a device for measuring the neutron output of pulsed sources by the activation method has been developed and created. The design parameters of the device are optimized. The results of measuring the outputs of pulsed neutron generators based on plasma focus chambers with deuterium and tritium filling are presented. The results of measuring neutron fluxes of isotope sources (AmBe, PuBe) and quasi-stationary neutron generators using the example of ING-07T are also presented.

Определение характеристик полей нейтронов по-прежнему является актуальной задачей в различных областях науки и техники [1]. Зачастую данная задача усложняется регистрацией сопутствующих рентгеновского и гамма-излучений. В случае использования импульсных источников нейтронов также имеет место высокая загрузка регистрирующей аппаратуры, которая приводит к наличию просчетов в получаемых результатах.

Рассмотрен экспериментальный образец прибора для измерения выходов нейтронов импульсных источников, работа которого основана на активационном методе. В качестве активационного материала использован слой природного индия толщиной 0,4 мм, окружающий счетчики β -излучения СБМ-19. Счетчики расположены в блоке замедлителя нейтронов из полиэтилена. Для снижения влияния рассеянного нейтронного излучения блок замедлителя окружен слоем кадмия толщиной 1 мм.

Рассмотренная конструкция прибора и особенности активационной методики регистрации позволяют исключить влияние на результаты измерения сопутствующих рентгеновского и гамма-излучений. Целевым для измерения является β -излучение со средней энергией ~ 1373 кэВ, образующееся в результате распада изотопа ^{116}In , период полураспада которого составляет ~ 14.1 с. Также при активации природного индия образуется ряд изотопов (основные из них – ^{114}In , $^{116\text{m}1}\text{In}$, $^{116\text{m}2}\text{In}$), излучение которых при распаде вносит вклад в получаемый результат. Учет данного вклада осуществляется программными методами. Прибор также позволяет оценить величину потока нейтронов изотопных источников и генераторов непрерывного типа. Проведены эксперименты по измерению выхода нейтронов для импульсных источников на основе камер плазменного фокуса сдейтериевым и тритиевым наполнением, эксперименты по регистрации непрерывного нейтронного потока для генератора ИНГ-07Т и изотопных источников (AmBe, PuBe).

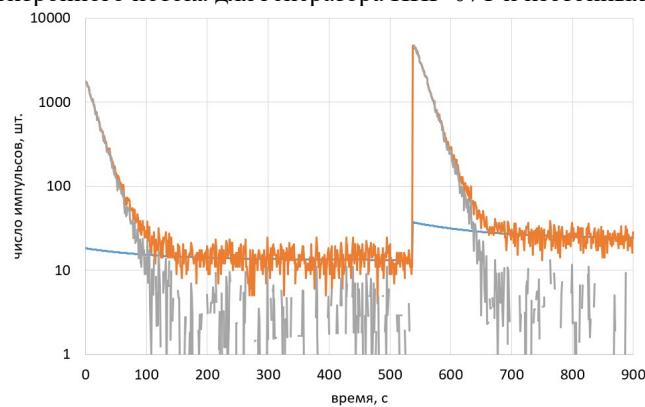


Рис. 1. Пример временной гистограммы счета импульсов СБМ-19

Список литературы

1. Evsenin A.V. et al. Detection of explosives and other illicit materials by nanosecond neutron analysis //Int. Topical Meeting on Nucl. Research Applic. and Utilization of Accelerators. 2009. C. 4-8.

А.Ф. КОВАЛЕНКО

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

ПРОБИТИЕ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В рамках одномерной задачи об испарении поглощающего слоя вещества при «мгновенном» выделении энергии лазерного импульса рассмотрены варианты пробития сквозных отверстий, позволяющие уменьшить энергетические затраты при указанном виде лазерной обработки неметаллических пластин.

A.F. KOVALENKO

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

PENETRATION OF THROUGH HOLES IN NON-METALLIC PLATES NANOSECOND LASER PULSES

Within the framework of the one-dimensional problem of evaporation of the absorbing layer of matter with the "instantaneous" release of laser pulse energy, options for punching through holes are considered, allowing to reduce energy costs with this type of laser treatment of non-metallic plates.

Одним из видов лазерной обработки неметаллических пластин является пробитие в них сквозных отверстий. Для уменьшения теплового влияния на пластину используют, как правило, наносекундные лазерные импульсы. Неметаллические пластины могут обладать объемным поглощением лазерного излучения. В ряде работ [1, 2] при допущении о «мгновенном» выделении энергии лазерного импульса получены аналитические соотношения для расчета плотности энергии, требуемой для пробития сквозного отверстия в неметаллической пластине и удельной (на единицу вложенной энергии) массы испарившегося материала:

$$W_1 = \frac{Qe^{\chi h}}{(1-R)\chi}; \quad (1) \quad m_{\text{уд}1} = \frac{\rho h}{(1-R)W_1} = \frac{\rho \chi h e^{-\chi h}}{Q}, \quad (2)$$

где: W_1 – плотность энергии, требуемая для пробития сквозного отверстия; Q – удельная энергия сублимации материала пластины; h – толщина пластины; χ – показатель поглощения материала пластины на длине волны воздействующего излучения; R – коэффициент отражения материала пластины; ρ – плотность материала пластины в твердой фазе.

Показано, что удельная масса испарившегося материала будет иметь максимальное значение, равное $0,368\rho/Q$, при значении безразмерного параметра $\chi h = 1$.

Рассмотрены несколько вариантов воздействия лазерного излучения наносекундной длительности на неметаллические пластины. Показана принципиальная возможность уменьшения энергетических затрат на пробитие сквозного отверстия в пластине до двух раз. На рис. показана зависимость удельной приведенной массы испарившегося материала от безразмерного параметра χh для шести вариантов воздействия лазерного излучения на пластину (1, 2, ..., 6 – варианты воздействия; $M_{\text{уд}i} = m_{\text{уд}i}Q/\rho$).

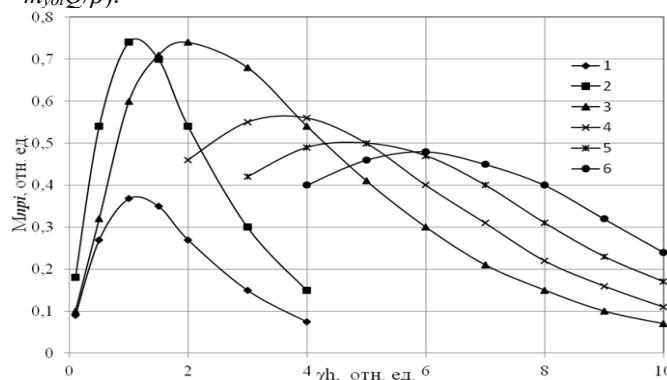


Рис.1. Зависимость удельной приведенной массы испарившегося материала от безразмерного параметра χh .

Список литературы

1. Коваленко А.Ф. // Стекло и керамика. 2017. № 7. С. 29 – 31.
2. Коваленко А.Ф. // Стекло и керамика. 2020. № 9. С. 7 – 10.

В.А. КУГАВДА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА, А.П. ДЕНИСЕНКО
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА EJ-276 БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Пластиковый сцинтиллятор EJ-276 – твердый, нетоксичный и легкий материал, используемый для регистрации быстрых нейтронов, при этом имеется возможность дискриминации событий от нейтронов и от гамма. При взаимодействии нейтронов с ядрами водорода и углерода образуются заряженные частицы и ионы, которые в актах ионизации теряют свою энергию. Эта энергия идет на образование оптических фотонов [1]. Сцинтилляционный дозиметр на основе EJ-276 способен регистрировать вторичные нейтроны с высокой энергией, сгенерированные высокогенеративными протонами галактического излучения или протонами на ускорителе. Пластиковые сцинтилляторы можно изготавливать разной формы и разных размеров. В данной работе была исследована зависимость эффективности регистрации нейтронного излучения пластиковым сцинтиллятором EJ-276 различных энергий от размеров и форм сцинтиллятора.

V.A. KUGAVDA, R.F. IBRAGIMOV, E.V. RYABEVA, A.P. DENISENKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SIMULATION OF RESPONSE OF PLASTIC SCINTILLATOR EJ-276 FAST NEUTRONS

Plastic scintillator EJ-276 is a solid, non-toxic and lightweight material used to register fast neutrons and there is possibility to discriminate events from neutrons and gammas. When neutrons interact with hydrogen and carbon nuclei, charged particles and ions are formed, which lose their energy in ionization acts. This energy goes to the formation of optical photons [1]. A EJ-276-based scintillation dosimeter is capable of detecting high-energy secondary neutrons formed by high-energy protons of galactic radiations or protons of an accelerator. Plastic scintillators can be made in different shapes and sizes. In this work, the dependence of the efficiency of recording neutron radiation by a plastic scintillator EJ-276 on various neutron energies and on sizes and shapes of scintillator was studied.

При создании физико-математической модели сцинтилляционного дозиметра на основе EJ-276 для регистрации нейтронного излучения необходимо учитывать нелинейность зависимости светового выхода от энергии заряженных частиц и ионов. В работе использовались зависимости светового выхода из литературных данных [2–5].

В работе проведено моделирование дозиметра на основе EJ-276 в среде GEANT4. В состав модели дозиметра входит: органический сцинтиллятор EJ-276 Ø40x40 mm; отражатель из майлара толщиной 100 мкм, окружающий пластик; корпус из алюминия толщиной 1 mm. С одного из торцов пластика EJ-276 собирается оптический свет с длинами волн в диапазоне энергий 2,034–4,136 эВ (от оранжевого света до средневолнового ультрафиолета). Количество каналов в собираемом спектре – 5000.

Излучение генерировалось в виде плоскопараллельного пучка диаметром 42,2 mm (в соответствии с диаметром чувствительного элемента). Точка запуска частиц находилась на расстоянии 200 см от торца детектора. В качестве первичных частиц запускались нейтроны. Моделирование проведено для различных энергий первичного излучения: от 20 до 100 МэВ с шагом 20 МэВ. Так же отдельно был смоделирован отклик на нейтроны с энергией 14,1 МэВ.

Анализ результатов моделирования показал, что можно увеличить эффективность регистрации нейтронов с энергией 100 МэВ почти в два раза увеличивая высоту сцинтиллятора. Если поместить сцинтиллятор EJ-276 в колодец из полистирина толщиной 10 см, то эффективность регистрации 100 МэВ нейтронов не изменяется.

Список литературы

1. W.F. Rogers, A.N. Kuchera et al. // Nucl. Instr. Methods in Physics Research Section A. 2019. №943. C. 1-10.
2. T. Ogawa , T. Yamaki, T. Sato. // PLoS ONE. 2018. C. 1-19.
3. S. Nyibule, J. Töke et al. // Nucl. Instr. Meth. Physics Research Section A. 2014. №768. C. 141-145.
4. W.R. Leo Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. - Germany: 1994. 365 c.
5. V. Verbinski, W. Burrus et al. // Nucl. Instr. and Methods. 1968. №8. C. 25.

И.М. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПЕННИНГА С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Представлены результаты исследований режимов работы малогабаритных ионных источников Пенninga в составе газонаполненных нейтронных трубок с неоднородным распределением магнитного поля в условиях импульсно-периодического питания. Для увеличения эффективности извлечения ионов предложено использовать в разрядных ячейках магнитные поля с линейно спадающей индукцией в направлении выходного электрода. По результатам исследований показано, что стабильность зажигания разряда повышалась при использовании систем питания, сохранявших положительный потенциал на аноде источника в паузах между импульсами напряжения.

I.M. MAMEDOV, S.P. MASLENNIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SMALL-SIZED PENNING ION SOURCES WITH NON-UNIFORM MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION

The results of studies of the operating modes of small-sized Penning ion sources in gas-filled neutron tubes with non-uniform magnetic field distribution under conditions of pulse-periodic power supply are presented. To increase the efficiency of ion extraction, it was proposed to use magnetic fields with linearly decreasing induction in the direction of the output electrode of the discharge cells. According to the research results, it was shown that the stability of discharge ignition increased when using power supply systems those maintained a positive potential on the source anode during pauses between voltage pulses.

Газонаполненные нейтронные трубы с ионными источниками Пеннинга применяются в нейтронных генераторах аппаратуры для геофизических исследований скважин, элементного анализа состава вещества, неразрушающего контроля, ядерной медицины. Условия зажигания разряда, его амплитудные и временные характеристики зависят от геометрии электродной системы, напряжения питания, величины и пространственного распределения магнитного поля, состава и давления газа в разрядной ячейке. Несмотря на длительную историю исследований, до настоящего времени не разработана единая физическая модель, которая бы описывала весь комплекс процессов горения разряда и формирования потоков ускоряемых ионов. Требованиями по обеспечению надёжной и продолжительной работы нейтронного оборудования в реальных условиях эксплуатации определяется актуальность проведения экспериментов для изучения разрядных процессов в ионных источниках Пеннинга.

В настоящей работе представлены результаты исследований режимов работы малогабаритных ионных источников Пеннинга с различными геометрическими параметрами в неоднородных магнитных полях в условиях импульсно-периодического питания разрядных ячеек.

Эксперименты проведены с использованием отпаянных образцов нейтронных трубок каротажной аппаратуры. Разрядная ячейка ионного источника, включавшая в себя размещенные на одной оси цилиндрического анода и двух дисковых катодов, помещалась в магнитное поле, которое формировалось с помощью цилиндрических токовых катушек и постоянных кольцевых магнитов. Условия работы ионных источников в магнитных полях с неоднородным распределением моделировались за счет осевого смещения токовых катушек относительно разрядной ячейки. Подробная информация об оснащении экспериментальных стендов и конструктивном исполнении исследованных нейтронных трубок приведена в работах [1-5].

В результате выполненных работ были определены зависимости амплитудных и временных характеристик разряда и формируемых ионных потоков от параметров и конфигурации наложенного на разрядную ячейку Пеннинга магнитного поля. Для повышения эффективности извлечения ионов предложено использовать в разрядных ячейках неоднородное распределение магнитного поля с линейно спадающей в направлении выходного электрода аксиальной составляющей индукции магнитного поля. Исследования режимов работы ионных источников при различных длительностях, скважности и частоты повторения импульсов напряжения показали, что при использовании систем питания с сохранением положительного потенциала на аноде в паузах между импульсами уменьшалось время задержки, и повышалась стабильность зажигания разряда Пеннинга.

Список литературы

1. Р.С. Рачков, А.Ю. Пресняков и др. // Атомная энергия. 2019. Т. 126. № 6. с. 334-337. DOI:10.1007/s10512-019-00569-3
2. Н.В. Мамедов, С.П. Масленников и др. // Физика плазмы, 2020, Т. 46, №2, с. 172–185. DOI:10.31857/S0367292120020067
3. С.П. Масленников, И.М. Мамедов // Атомная энергия, 2022, Т.133, Вып. 1, с. 50-53. DOI: 10.1007/s10512-023-00972-x
4. Н.В. Мамедов, С.П. Масленников и др. // ЖТФ, 2019, №9 (86), с. 1367-1375. DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48062.34-19
5. И.М. Мамедов, С.П. Масленников и др. // ЖТФ, 2024, Т.94, Вып.10. с. 1651-1658. DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58857.138-24

А.В. МАМОНТОВ, А.Н. ЮНАКОВ, Е.Д. КРАЙНОВ
АО «Научно производственное предприятие «Исток» им. Шокина», Фрязино, Россия

ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ НОВОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТОМОГРАФА С ДВОЙНЫМ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрено проектирование и разработка источника электронов компьютерного томографа последнего поколения. Представлены результаты конструкторских и технологических решений в части металлокерамического высоковольтного узла, импрегнированного катода, системы откачки. Даны результаты испытаний источника на номинальном значении напряжения питания.

A.V. MAMONTOV, A.N. UNAKOV, E.D. KRAYNOV
JSC "Scientific Production Enterprise "Istok" named after Shokina, Fryazino, Russia

ELECTRON SOURCES FOR A NEW ELECTRON BEAM COMPUTER TOMOGRAPH WITH A DOUBLE RADIATION SOURCE

The design and development of an electron source of a computer tomograph of the latest generation is considered. The results of design and technological solutions in terms of a high-voltage metal-ceramic assembly, an impregnated cathode, and a pumping system are presented. The results of testing the source at the nominal value of the supply voltage are given.

Основным элементом компьютерного томографа последнего поколения является источник электронов, представляющий собой электронную пушку с импрегнированным термоэмиссионным катодом. Ряд требований к данному узлу встречает значительные сложности при проектировании. Электронная пушка должна обеспечивать непрерывный и импульсный режим работы при напряжении катода (отрицательном) 140 кВ, долговечность работы более 10000 часов и исключение пробоев, под которыми понимается срабатывание систем защиты с полным отключением высокого напряжения.

Электронная пушка состоит из высоковольтного изолятора, держателя катода, дополнительного фокусирующего электрода, отделенного по потенциалу от потенциала катода, подогревателя катода, так же гальванически связанных по питанию и встроенного магнито-разрядного насоса.

Наибольшую сложность представляет металлокерамический узел высоковольтного изолятора. Предложена конструкция узла, исключающая возможность пробоя как по поверхности керамики, за счет сложной формы образующей изолятора, так и внутри вакуумной оболочки, за счет выбранных расстояний. Кроме того, разработана технология пайки, позволившая исключить наличие микротечей и обеспечить высокий уровень выхода годных узлов.

Отработана конструкция электронного источника, позволяющая осуществить откачуку узла при высоких температурах корпуса – более 400° С, что позволило провести не только поверхностное, но и объемное обезгаживание узлов и элементов конструкции, что так же способствовало возможности устойчивой работы источника при высоком уровне напряжения питания.

Все элементы конструкции проходили, кроме того, дополнительное высокотемпературное обезгаживание и химическую полировку.

Импрегнированный катод выполнен по обычной технологии и при номинальном режиме работы обеспечивает плотность тока с катода не более 1 А/см², что позволяет гарантировать наработку источника более 10000 часов.

Представлены результаты измерения накальных характеристик при малом значении напряжения питания для отработки технологии активирования импрегнированного катода. Даны результаты испытаний источника при номинальных значениях напряжения катода. Рассмотрен процесс тренировки высоковольтного узла. По результатам работ достигнуты требуемые параметры разработанного источника.

Г.В. МАРИЧЕВ, В.А. СТЕПАНОВ

Обнинский институт атомной энергетики (филиал) "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ",
Обнинск, Россия

ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРОНОВ

Предложена ионизационная камера ядерно-оптического преобразователя, в которой нейтронный поток регистрируется по интенсивности радиолюминесценции рабочего газа. Проведено сравнение экспериментальных измерений оптического сигнала от ядерно-оптического преобразователя в канале реактора ИВВ-2М с расчетной моделью возбуждения аргона продуктами взаимодействия нейтронов с атомами ^{10}B борида железа.

G.V. MARICHEV, V.A. STEPANOV

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of the National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Russia

NUCLEAR-OPTICAL CONVERTER FOR DETECTING NEUTRONS

An ionization chamber of a nuclear-optical converter is proposed, in which the neutron flux is recorded by the frequency of radioluminescence of the working gas. Experimental measurements of the optical signal from the nuclear-optical converter in the IVV-2M reactor channel with a calculated model of argon excitation, and the results of comparing the interaction of neutrons with ^{10}B iron boride atoms are carried out.

Ионизационная камера ядерно-оптического преобразователя (ЯОП) предназначена для измерения плотности потока нейтронов с помощью преобразования внешнего нейтронного потока в заряженные частицы, вызывающие ионизацию рабочего газа камеры α -частицами и ионами ^7Li [1,2]. В результате в камере ЯОП возникает электрический ток между электродами. В настоящей работе приведены результаты испытаний относительной эффективности нейтрон-чувствительных борных (^{10}B) радиаторных покрытий электродов камеры ЯОП в канале реактора ИВВ-2М.

Борные радиаторные покрытия с природным содержанием изотопов получали методом химико-термической обработки стали 12Х18Н10Т с образованием на поверхности сплошного слоя боридов железа толщиной более 40 мкм, в котором преобладает фаза FeB. В основе методики определения относительной эффективности покрытий лежит регистрация энергетических спектров продуктов реакции $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li}$ ($0,83 \text{ МэВ}$) + α ($1,47 \text{ МэВ}$) и сравнение их с аналогичными спектрами карбид-борных покрытий, используемых в серийных промышленных ионизационных камерах. Полученный спектр аргона показан на рисунке 1. Определена эффективность образования ионов в газовом пространстве камеры ЯОП. Для экспериментального борированного покрытия электрода ЯОП – $5,05 \cdot 10^{-4}$ ион/нейтр в сравнении с эталонным B_4C покрытием от камеры КНК-53 – $8 \cdot 10^{-4}$ ион/нейтр. Таким образом показана эффективность полученных борных покрытий на основе боридов железа для ЯОП.

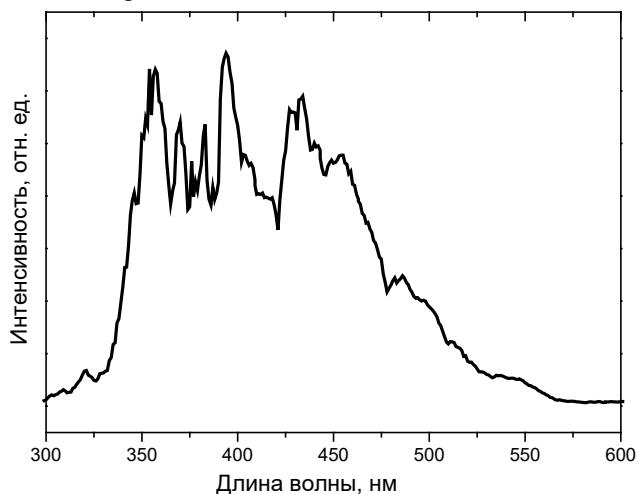


Рис. 1. Спектр свечения рабочего газа (Ar) ЯОП

Список литературы

1. Сахаров В.В., Маричев Г.В и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2021. № 4. С. 122-134
2. Омаров О.А., Омарова Н.О. и др. // Инженерная физика. 2013. № 5. С. 50-58.
3. Егоров Ю.А. Сцинтилляционный метод спектрометрии гамма излучения и быстрых нейтронов. М.: Госатомиздат, 1963. 306 с.

Ю.В. МИХАЙЛОВ. И.А. ПРОКУРАТОВ. Б.Д. ЛЕМЕШКО, А.К. ДУЛАТОВ
«Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»), Москва, Россия

РЕСУРС РАБОТЫ ОТПЯННЫХ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА КАК ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрен ресурс работы камеры плазменного фокуса (ПФ) из состава импульсных нейтронных генераторов разработки ФГУП «ВНИИА», обеспечивающих выход нейтронов в диапазоне от 10^5 до 10^{12} нейтр./имп. при дейтериевом или дейтерий-тритиевом наполнениях. Ресурс работы определяется как планомерное снижение выхода нейтронов относительно номинального уровня не более чем на 50 % или как резкий выход камеры ПФ из строя в одиночном срабатывании.

Yu.V. MIKHAILOV, I.A. PROKURATOV, B.D. LEMESHKO, A.K. DULATOV
Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, 127055 Russia

LIFETIME OF THE SEALED PLASMA FOCUS CHAMBER AS A PULSED NEUTRON SOURCE

The paper describes plasma focus (PF) chambers as a part of pulsed neutron generators developed by the FSUE “VNIIA”, that provides neutron yield from 10^5 to 10^{12} neutr./pulse with deuterium or deuterium-tritium filling. The lifetime defines as a neutron yield slow reduction relative to the nominal level by no more than 50% or a sudden failure of the chamber in a single pulse.

В работе описаны камеры плазменного фокуса (ПФ) из состава импульсных нейтронных генераторов разработки ФГУП «ВНИИА» [1]. Такие камеры обеспечивают выход нейтронов в диапазоне от 10^5 до 10^{12} нейтр./имп. при дейтериевом или дейтерий-тритиевом наполнениях. Значимыми параметрами камер ПФ для практических применений, кроме параметров нейтронного излучения в одиночных срабатываниях (уровень выхода нейтронов, длительность импульса нейтронов, энергия нейтронов и т.д.), является общий ресурс работы камеры с генерацией нейтронных импульсов (число срабатываний). Ресурс работы определяется как планомерное снижение выхода нейтронов относительно номинального уровня не более чем на 50 % или как резкий выход камеры ПФ из строя в одиночном срабатывании. Целью данной работы является исследование обоих вариантов.

Снижение выхода нейтронов в течение срабатываний связывается со снижением эффективности сжатия токоплазменной оболочки (ТПО) в пинч в камере ПФ и с накоплением примесей во внутреннем объеме камеры. Для нивелирования данного эффекта в камерах ПФ ФГУП «ВНИИА» используется генератор газа (ГГ) на основе пористого титана. В данной работе представлено экспериментальное сравнение работы отпаянных камер ПФ с и без блока ГГ. При разрядных токах 200-300 кА ресурс работы камер ПФ с ГГ превышает тысячу срабатываний. Также экспериментально показано, что для отпаянных камер ПФ с ГГ, средний выход нейтронов снижается менее чем на 50 % относительно номинального значения после 12-13 лет хранения.

Эффект нецилиндрического з-пинча, реализующийся в камера ПФ при сжатии ТПО токами в сотки кА, сопровождается импульсными механическими и электрическими нагрузками на конструктивные элементы камеры. Работа рассматривает влияние данных эффектов на камеры ПФ с амплитудой разрядных токов до 1000 кА в момент пинчевания. Проведены серии экспериментов на камерах ПФ сферической геометрии, впервые разработанными во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» [2], что позволило разработать камеру ПФ с выходом нейтронов $(1-2) \cdot 10^{11}$ нейтр./имп. и ресурсом более 300 срабатываний.

Список литературы

1. Dulatov A.K., Lemeshko B.D. et al.// J. of Physics: Conf. Series, no. 653. pp. 1–6, 2015, doi: 10.1088/1742-6596/653/1/012019.
2. Makeev N.G., Rumiantsev V.G., Cheremukhin G.N. Physics and technology of pulsed sources of ionizing radiation for the study of fast processes. Sarov: VNIEF, 1996 [in Russian].

А.О. МОРОЗОВ¹, С.А. ВОРОНИН², А.В. ПРОКОПЕНКО², М.Ю. СВАЛЕЕВ¹

¹АО «НПП «Магратеп», Фрязино, Московская обл., Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РЕКОНСТРУКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК ДЛЯ КТ АППАРАТОВ

В работе рассматривается возможность ремонта рентгеновской трубы с подвижным катодом ALTA750 компании Richardson Electronics широко применяемые в аппаратах компьютерной томографии в России. Одна из основных причин выхода из строя данного прибора состоит в необходимости замены катодного узла. Проведена оптимизация формы катода и пролетного расстояния для уменьшения вероятности возникновения пробоев на стенках катода при тренировке прибора после замены катода и для увеличения среднего срока службы рентгеновской трубы.

A.O. MOROZOV¹, S.A. VORONIN², A.V. PROKOPENKO², M.Yu. SVALEEV¹

¹Joint-stock Company 'NPP 'Magratep', Fryazino, Moscow reg., Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

RECONSTRUCTION OF X-RAY TUBES FOR COMPUTER TOMOGRAPHY DEVICES

The paper considers the possibility of repairing the ALTA750 X-ray tube with a movable cathode from Richardson Electronics, which are widely used in computed tomography devices in Russia. One of the main reasons for the failure of this device is the need to replace the cathode node. The cathode shape and span were optimized to reduce the likelihood of breakdowns on the cathode walls during device training after cathode replacement and to increase the average service life of the X-ray tube.

Основной проблемой при сервисном обслуживании компьютерных томографов является выход из строя рентгеновских трубок зарубежного производства [1]. В последние годы поставки новых рентгеновских трубок сталкивается с рядом ограничений. Разработка и внедрение отечественных аналогов мощных рентгеновских трубок только ведется. За последние два десятилетия у эксплуатирующих КТ аппараты организациям накопилось значительное количество рентгеновских трубок, которые могут подлежать ремонту. Последние три года ремонт и повторное использование мощных рентгеновских трубок организован в АО «НПП «Магратеп».

В процессе изучения вопросов реконструкции прибора рентгеновских трубок определены основные причины выхода их из строя. Одна причина заключается в необходимости замены вакуумного подшипника, установленного на врачающемся со скоростью от 3000 до 10000 об/мин массивном вольфрамовом аноде. В настоящее время эта проблема решается путем комплектации и сборки годных подшипников из бывших в употреблении рентгеновских трубок и разработкой аналогичных узлов. Одной из основных причин ремонта рентгеновских трубок является выход из строя катодного узла из-за эрозии двух вольфрамовых катодов. Решение этой проблемы состоит в замене старого катодного узла методом вырезания и установкой новых катодов с последующей восстановлением корпуса трубы, откачки и тренировки высоким напряжением.

Для улучшения характеристик устанавливаемых катодных узлов в работе с использованием пакета прикладных программ CST Studio проводилось моделирование электрических полей и движения электронов в катодном промежутке рентгеновской трубы ALTA750 компании Richardson Electronics. В созданных моделях оптимизировались пролетное расстояния пучка электронов и радиусы скругления корпуса в катодной области.



Рис. 1. Траектория пучка электронов в центральном сечении катодной области (а) и картина распределения напряженностей электрического поля в центральном сечении (б).

Проведенные расчеты показали, что незначительные изменения размеров которые происходят при монтаже новых катодов, не меняют динамику электронного пучка. Также удалось оптимизировать радиус скругления катода, что привело к снижению напряженности поля на 5%. Полученные при моделировании результаты использовались для подготовки конструкторской документации по ремонту рентгеновской трубы.

Список литературы

1. Erdi Y.E. Computed tomography x-ray tube life analysis: a multiyear study // Radiol Technol. 2013. 84(6). Pp. 567-570.

Д.Ю. НИЗАМОВ¹, С.А. ЗАЙЦЕВ¹, А.В. ЛАЗУКИН²

¹Московский Университет им. С. Ю. Витте, Москва, Россия

²Национальный Исследовательский Университет "Московский Энергетический Институт", Москва, Россия

ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСА ТОКА МИКРОРАЗРЯДА ДЛЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Предложены способы использования математической модели для приближения импульса тока в барьерном поверхностном разряде, для восстановления утерянной части импульса.

D.Yu. NIZAMOV¹, S.A. ZAYTSEV¹, A.V. LAZUKIN²

¹Moscow Witte University, Moscow, Russia

²National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

USING A MATHEMATICAL MODEL OF MICRODISCHARGE CURRENT PULSE FOR DATA PREPROCESSING FOR MACHINE LEARNING MODELS

Methods for using a mathematical model to approximate the current pulse in a barrier surface discharge and to restore the lost part of the pulse are proposed.

В системах сбора данных существуют аппаратные ограничения, которые приводят к потере части информации о сигнале. В данной работе приведены результаты анализа данных о микроразрядах в барьерном поверхностном разряде [1]. Алгоритм, умеющий детектировать и классифицировать микроразряды в сигнале, может быть полезен для оценки ресурса изоляции высоковольтного оборудования. Одним из перспективных вариантов такого алгоритма может быть решение на основе машинного обучения. В ходе анализа данных были выявлены две проблемы: амплитуда части импульсов превышает предел измерения (рис. 1, а), и новый импульс может возникнуть до полного окончания предыдущего (рис. 1, б). Были поставлены задачи восстановления урезанной амплитуды и выделения формы отдельных импульсов из суммарной кривой с целью увеличить качество датасета для обучения моделей ML.

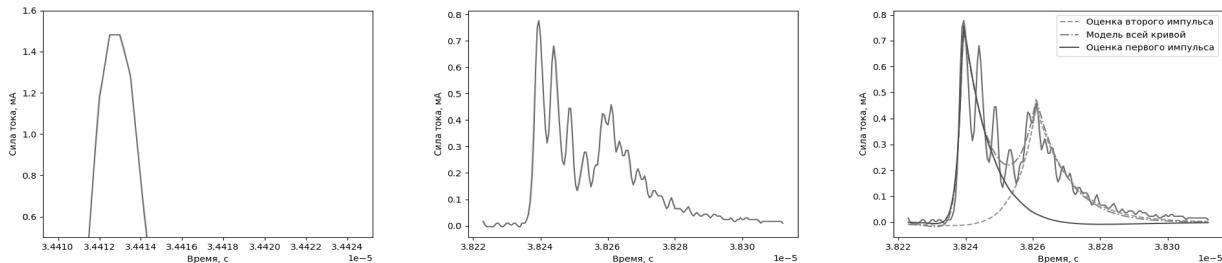


Рис. 1. а) Пример верхней части импульса тока с амплитудой выше предела измерения. б) Пример сигнала, состоящего из двух импульсов тока. в) Оценка формы первого импульса как разности общего сигнала и формы второго импульса

Использовалась математическая модель импульса, описанная в [2]: $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$, где $f_1(t)$ и $f_2(t)$ имеют одинаковый вид — произведение сигмоиды и экспоненты. Будем обозначать реальные данные как $i(t)$, а полученную модель — $\hat{i}(t)$. В качестве метрик качества приближения модели были использованы Root Mean Squared Error (RMSE), $\Delta A = |\max(i(t)) - \max(\hat{i}(t))|$ и $\Delta A_{rel} = 100\% \cdot \Delta A / \max(i(t))$. Способность модели приближать утерянную амплитуду оценивалась тестом: у каждого импульса из тестового набора из 60 импульсов срезалось 5-25% верхней части, затем модель обучалась на урезанном импульсе. Затем подсчитывались метрики для необрзанного импульса. Получены результаты: $\overline{\Delta A} = 0.08447\text{mA}$, $\overline{\Delta A_{rel}} = 8.4423\%$, $\overline{RMSE} = 0.0453\text{mA}$.

Для восстановления хвоста импульса был предложен следующий подход: сначала кривая обрезается таким образом, чтобы остался только второй импульс, и с помощью модели оцениваются его параметры $\hat{i}_2(t)$. Затем, модель $\hat{i}(t) = \hat{i}_1(t) + \hat{i}_2(t)$ обучается на всей кривой, при этом фиксируются параметры $\hat{i}_2(t)$, подбираются параметры $\hat{i}_1(t)$. (рис. 1, в). Для оценки качества использовалось сравнение с альтернативной методикой: сначала кривая обрезается таким образом, чтобы остался только первый импульс, затем модель обучается на нем. Для оценки качества приближения использовался следующий тест: два импульса складываются для получения суммарной кривой. Затем оценивается качество приближения реального первого импульса с помощью RMSE. Предложенный метод позволил сократить RMSE на 68.87%, с 0.1856mA до 0.0578mA, по сравнению с альтернативной методикой.

Список литературы

1. Lazukin A., Chernyshev T., Krivoruchko D. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. № 3. P. 033513. <https://doi.org/10.1063/1.5083182>.
2. Synek P., Zemánek M. et al. // Plasma Sour. Sci. Technol., 27(4):0

В.В. ФЕДОRENKO, С.Б. ЧЕБЫШОВ, В.С. ЯШИН
ООО "СофтЭксперт", г. Солнечногорск, Россия.

НОВЫЙ ПОДХОД В ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА

Рассмотрены способы электронного гашения лавины, формирования счетного импульса в газоразрядных счетчиках посредством электронной коммутации цепей питания счетчика. Рассмотрены различные алгоритмы обработки счетных сигналов счетчиков и способы блокирования «паразитных» импульсных сигналов при работе электронных ключей.

V.V. FEDORENKO, S.B. CHEBYSHOV, V.S. YASHIN
SoftExpert Ltd, Solnechnogorsk, Russia.

A NEW APPROACH IN GEIGER-MULLER COUNTER SIGNAL PROCESSING

Methods of electronic avalanche cancellation, counting pulse formation in gas-discharge counters by means of electronic switching of counter supply circuits are considered. Various algorithms for processing counting signals of counters and ways of blocking 'parasitic' pulse signals during the operation of electronic keys are considered.

Основная проблема при работе со счетчиками Гейгера-Мюллера связана с нестабильностью их передаточных характеристик. Основной причиной нестабильных характеристик счетчиков являются особенности технологии производства. Так как в качестве «гасящей» добавки в газовую смесь используются галогениды Cl_2 (Br_2), ключевую роль играет пассивация рабочих поверхностей счётчиков, контактирующих с галогенидами. Нарушение защитных покрытий изменяет первоначальный состав газовой смеси и характеристики счетчиков. Разработчики зачастую используют токовый режим включения для расширения диапазона. Однако данный режим более нестабилен, для устойчивой работы требует подстройку цепей счетчика для каждой технологической партии, а в реальности практически индивидуальной настройки. Кроме того, в данном режиме уменьшается ресурс работы счетчика, особенно при больших загрузках.

На наш взгляд, вышеперечисленные недостатки можно легко нивелировать, используя схемы электронного гашения лавины и применением иных алгоритмов обработки сигнала.

Однако 95% производителей аппаратуры в настоящее время используют стандартные схемы включения счетчиков и в качестве основной передаточной характеристики выбирают линейную часть зависимости скорости счета от мощности дозы. Недостатков в данном методе достаточно много. Это достаточно маленький динамический диапазон, при больших загрузках счетчик переходит в тлеющий режим и полностью прекращает работу, наличие двойных лавин (за счет фотоэлектронов), искажающих счетную характеристику случайным образом.

Переход на работу счетчика в импульсный режим исключает вышеперечисленные недостатки и позволяет реализовать все возможные режимы работ:

- подсчет времени от включения до первого импульса;
- подсчет времени между импульсами;
- подсчет количества импульсов за заданный промежуток времени;
- комбинация режимов работы в зависимости от загрузки.

В исходном состоянии на счетчик Гейгера-Мюллера подается высокое напряжение питания, ключ находится в разомкнутом состоянии. В данной позиции счетчик ничего не потребляет и к детектируемым частицам не чувствителен. После получения управляющего сигнала разрешения начала работы ключ подключает счетчик, и после завершения всех переходных процессов формирователь готов принять сигнал со счетчика.

При попадании ионизирующего излучения в счетчик возникает «электронная лавина». В обычной схеме подключения за счет достаточно большого тока лавины напряжение на счетчике падает гораздо ниже напряжения начала счета. После прохождения лавины счетчик «гаснет», и начинается плавный заряд емкостей до напряжения начала счета, после которого счётчик может сформировать следующий импульс. В нашем случае, как только напряжение на счетчике упало на 40-60 вольт формирователь принудительно отключает счетчик. Отключение счетчика в момент развития лавины позволяет избежать образование фотоэлектронов, срыв в режим тлеющего разряда, повторные паразитные лавины. После получения управляющего сигнала разрешения начала работы счетчик готов к работе.

Практическая реализация метода показала, что счетчик никогда не прекращает счет. Даже при запредельных загрузках счетчик работает с увеличенной погрешностью и не срывается в режим тлеющего разряда.

Тестирование режима подсчёта времени до первого события показало, что верхний диапазон определяется только точностью регистрации временного интервала и не зависит от параметров счетчика. Практические измерения показали возможность расширения диапазонов счетчиков на 3-4 порядка.

Список литературы

1. Патент 2755732 Способ управления цепью питания газоразрядного счетчика Гейгера-Мюллера. 18.03.2021
2. Гольданский В.И., Кузенко А.В., Подгорецкий М.И. Статистика обсчётов при регистрации ядерных частиц. Гос. изд. физ. –мат. литературы. Москва, 1959 г.

Д.К. ЧЕРЧЕНКО¹, Д.А. КОМАРОВ²

¹АО «НПП «Торий», Москва, Россия

²АО «НПП «Исток» им. Шокина», Фрязино, Россия

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ДЛЯ ЭВП СВЧ О-ТИПА

В рамках работы экспериментально, с использованием квадрупольного масс-спектрометра, определены удельные усредненные значения геометрического и температурного коэффициентов газовыделения материалов при термовакуумной обработке ЭВП СВЧ О-типа. Результаты апробированы математическим моделированием тестового прибора. По итогам работы удалось подтвердить возможность применения описанной математической модели при разработке технологии термовакуумной обработки для вновь проектируемых ЭВП СВЧ О-типа и оптимизации существующих технологий.

D.K. CHERCHENKO¹, D.A. KOMAROV²

¹JSC «RPE «Toriy», Moscow, Russia

²JSC «RPE «Istok» named after Shokin», Fryazino, Russia

ON THE ISSUE OF DETERMINING EXPERIMENTAL THERMAL DESORPTION COEFFICIENTS FOR O-TYPE MICROWAVE EVD

The specific average values of the geometric and temperature coefficients of gas release of materials during thermal vacuum treatment of O-type microwave EVD were determined experimentally using a quadrupole mass spectrometer. The results were verified by mathematical modeling of the test device. Based on the results of the work, it was possible to confirm the possibility of using the described mathematical model in the development of thermal vacuum treatment technology for newly designed O-type microwave EVD and optimization of existing technologies.

Процесс термовакуумной обработки (ТВО) занимает важное место в технологическом цикле изготовления электровакуумных приборов: получаемая в вакуумном объеме среда во многом определяет работоспособность и долговечность изделия. Однако на сегодняшний день технология проведения ТВО во многом определяется не теоретически обоснованными данными, а исходя из практического опыта производства. В значительной степени такая ситуация сложилась ввиду отсутствия математических моделей, позволяющих с достаточной точностью и за короткий промежуток времени произвести расчет данного процесса, характеризующийся сохранением высоких температур обработки в течении длительного промежутка времени. Особую трудность, ввиду разнообразия и сложности протекающих процессов, вызывает математическое описание термического газовыделения с внутренних поверхностей прибора.

Согласно источнику [1], поток газовыделения возможно представить в виде: $\frac{dQ_{\text{TB}}}{dt} = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot t}$, где α и β – геометрический и температурный коэффициенты соответственно. Основываясь на анализе большого массива экспериментальных данных, представляющих из себя масс-спектры различных приборов, полученные на этапе ТВО, определены удельные усредненные значения данных коэффициентов для основных компонентов остаточной газовой среды ЭВП СВЧ О-типа.

Полученные результаты проверены на тестовом приборе, не включенном в экспериментальный массив данных. Сделаны выводы о возможности применения полученных значений при моделировании процесса термовакуумной обработки ЭВП СВЧ О-типа.

Список литературы

1. Тягунов Г.А. Основы расчета вакуумных систем. М.: Госэнергоиздат, 1948 г., 148 с.

С.Н. ШАЦКИХ

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И ФОРМОВОЧНЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ КОМПАУНДЫ НА ОСНОВЕ НИЗКОВЯЗКИХ ЭФИРЭПОКСИДОВ

Рассмотрены результаты исследований по влиянию типа и концентрации активных разбавителей на технологические и эксплуатационные характеристики электроизоляционных и формовочных эпоксидных компаундов, применяемых, в том числе, для заливки электронных компонентов. Установлено, что применение в составе эпоксидных компаундов активного разбавителя эфирэпоксида марки Лапроксид 301Б позволяет повысить: жизнеспособность, электропрочность, термостойкость, а также снизить вязкость.

S.N. SHATSKIKH

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

ELECTRICAL INSULATING AND COATING EPOXY COMPOUNDS BASE ON LOW-VISCOSITY ETHEREPOXIDES

The result of studies on the effect of the type and concentration of active diluents on the technological and operational characteristics of electrical insulation and molding compounds used for pouring electronic components. It has been established that the use of the active diluent of the brand Laproxide 301B in the composition of epoxy compounds makes it possible to increase: viability, electrical resistance, heat resistance, and also reduce viscosity.

Эпоксидные компаунды – это термореактивные полимерные материалы, состоящие из эпоксидной смолы и отвердителя, применяемые для обеспечения электроизоляции, фиксации внутренних элементов и формирования габаритных размеров отдельных элементов электроаппаратуры. Однако у современных эпоксидных компаундов есть ряд недостатков: применённые в их составе инертные пластификаторы не связываются химически с эпоксидной матрицей компаунда, что может приводить в ходе эксплуатации к их десорбции из объёма компаунда; вязкость компаундов находится на высоком уровне, что особенно критично для наполненных компаундов; компаунды с отвердителями аминного типа обладают низкой жизнеспособностью; в процессе длительного хранения в эпоксидных компаундах с инертными пластификаторами возможна десорбция данных пластификаторов из объёма компаунда в окружающее пространство [1]. Поэтому целью данной работы является разработка технологических эпоксидных компаундов с низкой вязкостью, длительной жизнеспособностью и пластичностью.

За счет линейной структуры, относительно короткой длины молекул, наличия в структуре простой эфирной связи и только одной реакционноспособной эпоксидной группы использование активных разбавителей типа моноглицидиловых эфиров в составе компаундов позволит повысить их жизнеспособность и существенно снизить вязкость неотверждённых композиций, что позволит увеличить технологичность отдельных стадий их переработки. Учитывая влияние структуры модификатора на технологические и эксплуатационные свойства компаунда для проведения исследований были выбраны продукты Лапроксид 201Б (моноглицидиловый эфир н-бутанола) и Лапроксид 301Б (моноглицидиловый 2-бутоксиэтанола).

По результатам проведенных исследований разработаны и научно обоснованы составы эпоксидных компаундов, обладающие необходимым комплексом характеристик: технологических (низкая вязкость, длительная жизнеспособность) и эксплуатационных (высокая электропрочность, термо- и вакуумная стойкость): электроизоляционный заливочно-пропиточный эпоксидный компаунд, включающий эпоксидную смолу ЭД-22, активный разбавитель Лапроксид 301Б и отличающийся тем, что он содержит отвердитель Джейфамин D-230 при следующем соотношении компонентов: (100 / 20 / 38,7) м. ч. соответственно; эпоксидно-кварцевый компаунд, включающий эпоксидную смолу ЭД-20, кварцевый наполнитель, отвердитель полиэтиленполиамин и отличающийся тем, что вместо инертного пластификатора используют активный разбавитель Лапроксид 301Б при следующем соотношении компонентов: (100 / 60-200 / 12-20 / 10) м. ч. соответственно; наполненный формовочный эпоксидно-ферритовый компаунд, включающий эпоксидную смолу ЭД-22, ферритовый наполнитель, отвердитель полиэтиленполиамин, и отличающийся тем, что вместо инертного пластификатора используют активный разбавитель Лапроксид 301Б при следующем соотношении компонентов: (100 / 500-600 / 24 / 20), м. ч. соответственно [2,3].

Список литературы

1. Чурсова Л.В., Панина Н.Н. и др. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. – Санкт-Петербург: ЦОП «Профессия», 2020. – 576 с.
2. Патент № 2787124 РФ. Электроизоляционный заливочно-пропиточный компаунд: № 2022123170: заявл. 29.08.2022: опубл. 28.12.2022 Бюл. № 1.
3. Патент № 2680999 РФ. Высоконаполненный компаунд для изготовления ферромагнитных сердечников: № 2680999: заявл. 18.12.2017: опубл. 01.03.2019 Бюл. № 7.

**Секция
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

Руководитель секций

– д.ф.-м.н., профессор Попруженко
Сергей Васильевич

Секретарь секций

– д.ф.-м.н., профессор Городничев
Евгений Евгеньевич

– к.ф.-м.н., доцент Воронова Нина
Сергеевна

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9377

E-mail: gorodn@theor.mephi.ru, nsvoronova@mephi.ru

А.А. ШЕЛКОВОЙ¹, С.А. УРЮПИН^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТОРМОЖЕНИЕ ПУЧКА БЫСТРЫХ ИОНОВ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ В ПЛАЗМЕ С РАЗВИТОЙ ИОННО-ЗВУКОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

Описано торможение разреженного пучка ионов в плазме с ионно-звуковой турбулентностью, возникающей в сильном электрическом поле. При торможении вдоль или поперек оси симметрии распределения ионно-звуковых волн по волновым числам получены зависимости компонент скорости ионов пучка от времени или координаты для различной напряженности электрического поля. Найдены времена и длины торможения пучка вдоль и поперек электрического поля. Торможение прекращается, когда скорость ионов пучка близка к скорости ионного звука.

A.A. SHELKOVY¹, S.A. URYUPIN^{1,2}

¹P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DECELERATION OF LOW-DENSITY BEAM OF IONS IN PLASMA WITH DEVELOPED ION-AcouSTIC TURBULENCE

The deceleration of a rarefied beam of ions in plasma with ion-acoustic turbulence arising in a strong electric field is described. During deceleration along or across the anisotropy axis of the wavenumber distribution of ion-acoustic waves, the dependencies of the ion beam velocity components on time or coordinate for different electric field strengths are obtained. The time and length of beam deceleration along and across the electric field are found. The deceleration stops when the ion beam velocity is close to the ion sound velocity.

В исследованиях свойств плазмы часто используются пучки ионов. Закономерности проникновения пучков в плазму хорошо изучены в условиях, когда торможение идёт вследствие кулоновского взаимодействия ионов пучка с частицами плазмы. Однако в установках с магнитным удержанием плазмы могут реализоваться состояния, в которых температуры электронов T_e и ионов T_i отличаются весьма сильно. В неизотермической плазме могут существовать ионно-звуковые волны. В таких условиях под действием сильного электрического поля $\mathbf{E} = (0, 0, E)$ в плазме развивается ионно-звуковая турбулентность (ИЗТ). При этом торможение пучка ионов со скоростью большей скорости звука происходит из-за черенковского взаимодействия с ионно-звуковыми волнами [1].

Используя квазилинейное уравнение для функции распределения ионов, получены уравнения для компонент скорости ионов пучка $\mathbf{u} = (u_\perp, u_z)$. Плотность ионов пучка считается малой по сравнению с плотностью плазмы n . Такой пучок не влияет на распределение ионно-звуковых волн по волновым числам $N(\mathbf{k})$, и для функции $N(\mathbf{k})$ можно использовать результатами работы [2].

Параметры плазмы выбраны следующими: $T_e = 300$ эВ, $T_i = 50$ эВ, $n = 10^{13}$ см $^{-3}$. Рассмотрено два варианта распространения пучка в плазме. Первый вариант отвечает ситуации, когда скорость пучка ионов направлена вдоль электрического поля. Из-за аксиальной симметрии функции $N(\mathbf{k})$ поперечные компоненты скорости не возникают. На Рис. 1 (A) приведены зависимости u_z/v_s от $t v_f$, полученные для нескольких значений E/E_N , где $v_s = 1.7 \times 10^7$ см/с – скорость ионного звука, $v_f = 2.9 \times 10^7$ см $^{-1}$ – характерная частота взаимодействия ионов пучка с ионным звуком, а $E_N = 13$ В/см – характерное электрическое поле, определяемое параметрами плазмы. Кривые на Рис. 1 (A) иллюстрируют уменьшение во времени скорости ионов. Второй вариант отвечает ситуации, когда исходная скорость ионов пучка направлена поперек электрического поля. В этом случае вместе с уменьшением компоненты u_\perp происходит изменение компоненты u_z . На Рис. 1 (B) и (C) показаны зависимости u_\perp/v_s и u_z/v_s от $t v_f$ для нескольких значений E/E_N . Во всех случаях торможение вследствие черенковского взаимодействия прекращается, когда скорость ионов пучка становится равной скорости ионного звука v_s .

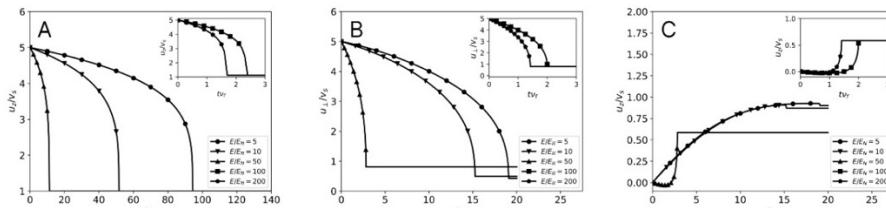


Рис. 1. Изменение скорости пучка u_z во времени (A) при торможении вдоль электрического поля. Изменение скорости u_\perp (B) или u_z (C) во времени при торможении поперек электрического поля.

Список литературы

1. Shelkovoy A.A., Uryupin S.A. // Phys. Rev. E 2024. Vol. 109, № 4. P. 045206-1 – 045206-7.
2. Bychenkov V.Yu., Silin V.P., Uryupin S.A. // Phys. Rep. 1988. Vol. 164, № 3. P. 119–215.

Д.А. ГОЖЕВ¹, О.Е. ВАЙС^{1,2}, С.Г. БОЧКАРЕВ^{1,2}, В.Ю. БЫЧЕНКОВ^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Центр фундаментальных и прикладных исследований, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНО-НАГРЕТЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ КЛАСТЕРНОЙ И МИКРОКАПЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

В работе с помощью 3D PIC моделирования исследован нагрев микрокластерной среды, облучаемой ультракоротким лазерным импульсом умеренно релятивистской интенсивности. Определены условия оптимального стохастического нагрева, в том числе зависимости средней энергии и выхода горячих электронов от интенсивности импульса. На основе анализа траекторий представительских частиц был получен и проанализирован спектр синхротронного излучения в кластерной среде при различных лазерно-кластерных параметрах.

D.A. GOZHEV¹, O.E. VAIS^{1,2}, S.G. BOCHKAREV^{1,2} and V.YU. BYCHENKOV^{1,2}

¹P.N. Lebedev Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

²Center for Fundamental and Applied Research, Dukhov Research Institute of Automatics ROSATOM, Moscow, Russia

GENERATION OF LASER-HEATED ELECTRONS AND SYNCHROTRON RADIATION FROM CLUSTER AND MICRODROPLET PLASMA

In this work, using 3D PIC simulations, the heating of a microcluster medium irradiated by an ultrashort laser pulse of moderately relativistic intensity was studied. The conditions for optimal stochastic heating are determined, including the dependence of the average energy and the yield of hot electrons on the pulse intensity. Based on the analysis of the trajectories of representative particles, the spectrum of synchrotron radiation in a cluster medium was obtained and analyzed for various laser-cluster parameters.

Хорошо известно, что кластеризация газовой среды позволяет существенно повысить выход лазерно-ускоренных электронов и ионов, создать условия для эффективной генерации термоядерных нейтронов [1], электромагнитного [2], а также ТГц-излучения [3]. Благодаря возможности к быстрому восстановлению исходных параметров кластерных струй такие мишени хорошо подходят для экспериментов с мощными лазерными системами с высокой частотой повторения. Однако для того, чтобы максимально поднять выход горячих частиц и вторичного излучения, необходимо хорошее понимание механизма нагрева и ускорения заряженных частиц, а также генерации вторичного электромагнитного излучения.

В работе исследовалось взаимодействие фемтосекундного релятивистско-интенсивного лазерного импульса с кластерной средой тяжелых элементов (на примере атомов золота). Для 3D PIC моделирования лазерно-кластерного взаимодействия в большом объеме использовался оригинальный метод, когда непосредственно расчет проводится в относительно небольшой области с высоким пространственным разрешением, а падающий лазерный пучок задается в плоско-волновом приближении [1]. После проведения расчетов результаты обобщаются на весь объем взаимодействия. В моделировании варьировались размеры кластеров и интенсивность лазерного излучения.

Исследование показало формирования в спектре квазимоноэнергетического плато, которое содержит значительное количество горячих электронов. Средняя энергия частиц в плато пропорциональна интенсивности лазерного импульса, что объясняется стохастическим характером нагрева электронов в сложных лазерных и кулоновских полях. При этом число частиц в плато обратно пропорционально амплитуде лазерной волны и практически не зависит от диаметра кластеров для кластеров субмикронного размера. В зависимости от интенсивности лазерного излучения можно получать или большее число электронов меньшей энергии, или меньшее число высоконергетических частиц.

Оценка выхода и спектрального состава вторичного излучения проводилась путем анализа характеристик излучения ансамбля выбранных частиц. Характеристики синхротронного некогерентного излучения были вычислены по формулам запаздывающих потенциалов для выбранных траекторий частиц. Широкая платообразная часть спектра электронов приводит к формированию широкого частотного спектра некогерентного синхротронного излучения с критической частотой, монотонно растущей пропорционально интенсивности лазера в рассматриваемом диапазоне его интенсивности.

Расчеты показали слабую анизотропию спектров синхротронного излучения при умеренных интенсивностях лазера. Для релятивистски сильного импульса анизотропия заметна, причем максимум спектральной плотности излучаемой энергии соответствует направлению назад. Это объясняется излучением в направлении навстречу лазерному импульсу при движении под действием сильного кулоновского поля кластеров. Коэффициент конверсии в излучение синхротронного типа не превышает значения 10^{-5} при интенсивности излучения порядка $4 \times 10^{19} \text{ Вт/см}^2$.

Работа выполнена в рамках научной программы НЦФМ (проект “Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023-2024”). О.Е. Вайс выражает благодарность Фонду развития теоретической физики и математики «Базис» (грант № 22-1-3-28-1).

Список литературы

1. D.A. Gozhev, S.G. Bochkarev, M.G. Lobok et al., Physics of Plasmas, **31**, № 7 (2024)
2. Андреев А.А, Платонов К.Ю., Квантовая электроника, **52**, № 2 (2021)
3. Nagashima T. et al, Optics Express, **17**, № 11 (2009)

А.И. БАРАНОВА, А.А. ТИЩЕНКО
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

О КИНЕМАТИКЕ СВЕРХСВЕТОВОГО ИСТОЧНИКА В ВАКУУМЕ

Рассмотрена кинематика области поляризации, создаваемой равномерно вращающимся пучком на границе раздела среда/вакуум. Продемонстрировано, что индуцированная область поляризации может перемещаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме в течение конечного промежутка времени. Интересно, что при некоторых условиях рассматриваемая область может распасться на два разбегающихся друг от друга сверхсветовых « пятна ». Обсуждаются способы расчета черенковского излучения от сверхсветовых источников разной природы, индуцированных пучками заряженных частиц и лучом света.

A.I. BARANOVA, A.A. TISHCHENKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ON THE KINEMATICS OF A SUPERLUMINAL SOURCE IN VACUUM

We consider the kinematics of a superluminal spot formed by a uniformly rotating beam at the medium/vacuum. We show that the induced polarization region can move with a velocity exceeding the velocity of light in vacuum, but only during a finite period of time. Interestingly, under certain conditions the considered spot can split into two superluminal spots running away from each other. We also discuss the methods to calculate Cherenkov radiation from the sources of different nature, i) induced by a charged particles beam and ii) by a beam of light.

Широко известно, что специальная теория относительности запрещает сверхсветовые скорости для любых материальных объектов и сигналов. Это утверждение, справедливое для отдельных тел/частиц, однако, имеет ряд важных исключений [1]. В принципе, для многочастичных систем существует теоретическая возможность существования источников, двигающихся со скоростью выше скорости света в вакууме. Источники сверхсветового излучения изучаются, например, в астрофизике [2], а также на более компактных масштабах, в условиях обычной лаборатории [3, 4].

В настоящей работе мы исследуем характеристики излучения, возникающего при падении равномерно вращающегося пучка (заряженных частиц, фотонов ли) на некоторую горизонтальную поверхность. Безотносительно природы составляющих его частиц, такой пучок будет индуцировать поляризационные токи, область локализации которых со временем будет перемещаться по поверхности. Оказывается, при определенных условиях это « пятно поляризации » действительно может двигаться со сверхсветовой скоростью. Мы показали, что скорость его передвижения будет превосходить скорость света лишь в течение ограниченного промежутка времени, что напрямую определяет его пространственный размер как источника излучения. Еще один интересный результат состоит в том, что рассматриваемый пучок может распасться на уже два разбегающихся друг от друга сверхсветовых « пятна ». В контексте возможности генерации электромагнитного излучения по черенковскому механизму, это приведёт к возникновению уже двух черенковских конусов в картине пространственного распределения излучения. Также, мы обсуждаем методы расчета характеристик черенковского излучения от источников различной природы, заряженных частиц и нейтральных (фотоны).

Список литературы

1. V. L. Ginzburg, *Theoretical Physics and Astrophysics* (International Series in Natural Philosophy, V. 99) (Pergamon, 1979).
2. R.J. Nemiroff, Superluminal Spot Pair Events in Astronomical Settings: Sweeping Beams, *PASA* 32, e001 (2015).
3. Daigo Oue, Kun Ding, and J. B. Pendry, Čerenkov radiation in vacuum from a superluminal grating, *Phys. Rev. Research* 4, 013064 (2022).
4. M. I. Bakunov, A. V. Maslov, and S. B. Bodrov, Cherenkov radiation of terahertz surface plasmon polaritons from a superluminal optical spot, *Phys. Rev. B* 72, 195336 (2005).

О.Е. ВАЙС, М.Г. ЛОБОК, В.Ю. БЫЧЕНКОВ
Физический институт академии наук им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

ГЕНЕРАЦИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО САМОЗАХВАТА МУЛЬТИТЕРАВАТТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

Релятивистский самозахват лазерного импульса в режиме «лазерной пули» сопровождается генерацией яркого синхротронного (бетатронного) излучения, что обусловлено большими суммарными зарядами ускоренных электронов и их высокими энергиями. В работе проведено исследование по влиянию длительности лазерного импульса заданной энергии на формирования вторичного излучения. Показано, что сжатие лазерного импульса обеспечивает увеличение конверсии энергии лазерного импульса в энергию синхротронного излучения, а также на порядок увеличивает яркость такого источника.

O.E. VAIS, M.G. LOBOK, V.YU. BYCHENKOV
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SYNCHROTRON RADIATION GENERATED UNDER RELATIVISTIC SELF-TRAPPING OF MULTI-TERAWATT LASER PULSE

Relativistic self-trapping of a laser pulse in the "laser bullet" regime is accompanied by the generation of bright synchrotron (betatron) radiation, which is due to the large total charges of accelerated electrons and their high energies. We study the effect of the duration of a laser pulse of a given energy on the formation of secondary radiation. It is shown that compression of a laser pulse provides an increase in the conversion of laser pulse energy into synchrotron radiation energy, and also increases the brightness of such a source by an order of magnitude.

При лазерно-плазменном ускорении электронов в таких режимах как LWFA или DLA частица испытывает влияние поперечных полей, которые приводят к бетатронным осцилляциям в плоскости, поперечной направлению движения ускоряемого пучка электронов. Такое периодическое движение заряженной частицы сопровождается синхротронным излучением, которое в рассматриваемых случаях обладает уникальными характеристиками: ультра-короткой длительностью, рекордной яркостью и узкой направленностью [1,2].

Для исследования характеристик синхротронного излучения, генерируемого ускоренными электронами в результате их бетатронных осцилляций, была проведена серия трехмерных PIC-моделирований взаимодействия лазерного импульса с плазменными мишенями различной плотности с использованием кода VSim. Во всех численных расчетах линейно поляризованный лазерный импульс с гауссовым пространственно-временным профилем и длиной волны $\lambda_l = 0.8$ мкм имел энергию 0.85 Дж и был сфокусирован в пятно диаметром 2.8 мкм. Длительность лазерного импульса по уровню половинной мощности была равна 10 и 40 фс в предположении, что сжатый лазерный импульс может быть получен методом CafCA практически без энергетических потерь [3, 4].

Траектории частиц, полученные в численном моделировании, были использованы для расчета спектрально-угловых распределений вторичного излучения. Спектры излучения рассчитывались на основе запаздывающих потенциалов, которые были преобразованы в хорошо известные соотношения для спектральной плотности мощности, излучаемой в единицу спектрального диапазона и единицу телесного угла:

$$\frac{d^2I}{d\Omega d\omega} = \frac{e^2}{4\pi^2c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[n \times (n - \beta) \times \dot{\beta}]}{(1 - \beta \cdot n)^2} e^{i\omega\{t - n \cdot r(t)/c\}} dt \right|^2,$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор электрона, $\beta = \mathbf{v}/c$ – безразмерная скорость частицы, \mathbf{n} – единичный вектор, указывающий направление наблюдения.

Проведенные исследования показали, что ожидаемая критическая частота синхротронного излучения, которое может быть получено на установке мультитеравтной мощности, оказывается равной 100 кэВ. При этом максимум энергии переизлучается в виде фотонов с энергией около десяти килоэлектронвольт. Проведенное исследование показало, что сжатие лазерного импульса с 40 фс до 10 фс позволяет значительно улучшить характеристики синхротронного излучения, а именно обеспечить двухкратное увеличение генерируемых частот, 4-х кратное увеличение конверсии энергии лазерного импульса в энергию фотонов и на порядок большую яркость.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023-2025»). О.Е. Вайс выражает благодарность Фонду развития теоретической физики и математики «Базис» (грант № 22-1-3-28-1).

Список литературы

1. Lobok M.G., Andriyash I.A., Vais O.E. and others // Phys. Rev. E. 2021. Vol. 104, № 5. P. L053201.
2. Vais O.E., Lobok M.G., Bychenkov V.Yu. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2023. Vol. 50, №. Suppl 7. P. S806–S814.
3. Vais O.E., Lobok M.G., Soloviev A.A. and others //JETP Letters. 2023. Vol. 118, №. 12. P. 875–880.
4. Khazanov E.A., Mironov S.Y., Mourou G. //Physics-Uspekhi. 2019. Vol. 62, №. 11. P. 1096.

Ф.О. КИСЕЛЁВ, Д.Ю. СЕРГЕЕВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СПИРАЛЬНАЯ ПЛАСТИНКА КАК ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрено возбуждение электроном рентгеновского переходного излучения от спиральной пластинки. Рассчитаны поле и спектрально-угловое распределение излученной энергии. Мишень имеет одну плоскую и одну спиральную грани, что позволяет наблюдать фазу излучения в выражениях для интенсивности. Проведен анализ полученных выражений на предмет закрученности излучения.

F.O. KISELEV, D.Yu. SERGEEVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SPIRAL PLATE AS A SOURCE OF X-RAY TRANSITION RADIATION

The excitation of X-ray transition radiation from a spiral plate by an electron is considered. The field and spectral-angular distribution of the emitted energy are calculated. The target has one flat and one spiral face, which allows observing the radiation phase in expressions for intensity. The twisted properties of the radiation are discussed.

В 1992 году Аллен опубликовал статью, посвященную закрученному свету [1], то есть свету, обладающему орбитальным угловым моментом. С этой публикации начался активный процесс исследований данной тематики, не заканчивающийся до сих пор. Закрученный свет используется для управления микрообъектами (например, микротурбинами), для захвата частиц в ловушки [2] и т.д.

Переходное излучение возникает при пересечении заряженной частицей границы раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Оно хорошо изучено теоретически и экспериментально. Сегодня переходное излучение различных частотных диапазонов используется, например, для трекинга заряженных частиц, диагностики сгустков заряженных частиц или как мощный источник излучения [3].

В настоящей работе исследуется рентгеновское переходное излучение, возбуждаемое при пересечении релятивистским электроном мишени в форме спиральной пластинки (Рис. 1). Мишень имеет одну плоскую и одну спиральную грани. В оптике, при пропускании через похожие пластинки плоских волн получают закрученный свет [4, 5]. Поэтому стоит ожидать, что переходное излучение от такой мишени будет обладать закрученными характеристиками.

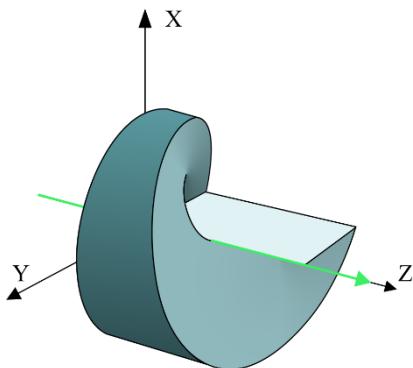


Рис. 1 Спиральная пластинка для возбуждения рентгеновского переходного излучения электроном.

В работе получено аналитическое выражение для поля излучения в области высоких частот, а также спектрально-угловая плотность энергии излучения. Расчеты проводились с помощью метода поляризационных токов. Показано, что, так как одна из граней мишени является плоской, а другая спиралевидная, то интерференция переходного излучения от этих двух граней позволит определить "закрученность" излучения от второй грани, потому что информация о фазе последней сохранится в выражении для интенсивности излучения.

Список литературы

1. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P. // Phys. Rev. A. 1992. Vol. 45. P. 8185.
2. Bialynicki-Birula I., Radozycki T. // Phys. Rev. A. 2016. Vol. 93. P. 063402.
3. Kuratov A.S., Brantov A.V., Kovalev V.F., Bychenkov V.Yu. // Phys. Rev. E. 2022. Vol. 106. P. 035201.
4. Turnbull G.A., Robertson D.A., Smith G.M., Allen L., Padgett M.J. // Opt. Commun. 1996. Vol. 127. P. 183.
5. Schemmel P., Pisano G., Maffei B. // Optics Express. 2014. Vol. 22. P. 14712.

Д.Д. БАРАНОВ, А.В. ХУДОВ, С.В. ПОПРУЖЕНКО
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, Москва, Россия

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ В ФОКУСИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Получены квазиклассические формулы, описывающие скорость релятивистской ионизации атомного уровня в постоянном электромагнитном поле с произвольной пространственной конфигурацией. Найдена лидирующая поправка к нерелятивистской скорости ионизации, зависящая от взаимной ориентации векторов электрического и магнитного поля и отношения их величин. Построено распределение скорости ионизации по импульсу фотоэлектрона.

D.D. BARANOV, A.V. HODOV, S.V. POPRUZHENKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia
Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

RELATIVISTIC IONIZATION OF HEAVY ATOMS IN FOCUSED INTENSE ELECTROMAGNETIC FIELD

Semiclassical formulas are obtained that describe the rate of relativistic ionization of an atomic level in a constant electromagnetic field. A leading correction to the non-relativistic ionization rate has been found, which depends on the mutual orientation of the electric and magnetic field vectors and on the ratio of their absolute values. The distribution of the ionization rate by the photoelectron momentum is obtained.

Получение импульсов лазерного излучения мультипетаваттной мощности открывает широкие перспективы исследований фундаментальных эффектов взаимодействия электромагнитных полей экстремальной интенсивности с веществом и вакуумом [1,2]. Возможность наблюдения нелинейных явлений классической и квантовой электродинамики при таком взаимодействии определяется в основном величиной пиковой интенсивности излучения, достигаемой в центре лазерного фокуса. В настоящее время, согласно [3], максимальное значение интенсивности находится на уровне 10^{23} Вт/см². С ожидаемым в ближайшее десятилетие переходом мощности в суб-экзаваттный режим [4], могут быть достигнуты интенсивности порядка $10^{25} - 10^{26}$ Вт/см². В полях такой интенсивности будет наблюдаться глубокая ионизация многоэлектронных атомов, приводящая к образованию ионов с зарядом $Z = 50$. При высоких интенсивностях лазерного излучения инфракрасного диапазона длин волн динамика ионизации атомов близка к туннелированию в постоянном поле [5]. Теория туннельной ионизации в сверхсильном электромагнитном поле, в том числе с учетом релятивистских эффектов, была подробно развита в работе [6], в которой использовалось приближение, предполагающее, что векторы напряженности электрического и магнитного полей перпендикулярны, но могут быть разными по величине. Рассматривался также случай параллельных полей. Однако, получение сверхвысоких интенсивностей излучения возможно только при очень жесткой фокусировке лазерного пучка, на уровне дифракционного предела. В этом случае поля и в фокусе не ортогональны и не равны по величине. Для описания релятивистской ионизации глубоких атомных уровней в таких полях, полученные в [5,6] результаты нуждаются в обобщении.

В данной работе мы представляем обобщение квазиклассических формул для скорости релятивистской ионизации атомного уровня в постоянном электромагнитном поле [6] на случай, когда пространственная конфигурация этого поля произвольна. В расчетах используется метод мнимого времени [5], где траектории вычисляются путем перехода в систему отсчета, в которой электрическое и магнитное поле параллельны, а затем, после обратного перехода в систему покоя многозарядного иона, начальные условия для этих траекторий определяются так, чтобы обеспечить возможность ионизации. Кроме того, с помощью теории возмущений получено приближенное выражение для скорости ионизации в нерелятивистском пределе, и проведено её сравнение с общим выражением.

Полученные уравнения позволяют найти скорость образования многозарядных ионов в сверхсильном жестко фокусированном лазерном поле и распределения фотоэлектронов по импульсам. Результаты позволяют оценить вклад релятивистских эффектов в подбарьерную туннельную динамику и представляют интерес для диагностики мощных лазерных пучков и физики лазерной плазмы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №25-22-00308).

Список литературы

1. Попруженко С. В., Федотов А. М. Динамика и излучение заряженных частиц в лазерных полях экстремальной интенсивности //Успехи физических наук. – 2023. – Т. 193. – №. 5. – С. 491-527.
2. Fedotov A. et al. Advances in QED with intense background fields //Physics Reports. – 2023. – Т. 1010. – С. 1-138.
3. Yoon J. W. et al. Realization of laser intensity over 10^{23} W/cm² //Optica. – 2021. – Т. 8. – №. 5. – С. 630-635.
4. Bashinov A. V. et al. New horizons for extreme light physics with mega-science project XCELS //The European Physical Journal Special Topics. – 2014. – Т. 223. – С. 1105-1112.
5. Попов В. С. Туннельная и многофотонная ионизация атомов и ионов в сильном лазерном поле (теория Келдыша) //Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174. – №. 9. – С. 921-951.
6. Мур В. Д., Карнаков Б. М., Попов В. С. Релятивистская версия метода мнимого времени //ЖЭТФ. – 1998. – Т. 114. – С. 798.

Н.Д. БУХАРСКИЙ, Ф.А. КОРНЕЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

О ВОЗМОЖНОСТИ КОЛЛИМАЦИИ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ ТИПА «УЛИТКА»

Рассмотрена возможность использования электромагнитных структур, возбуждаемых при облучении мишней типа «улитка» ультракороткими лазерными импульсами релятивистской интенсивности, для управления потоками ускоренных заряженных частиц. Проведены оценки эффективности коллимации пучка ускоренных частиц в зависимости от параметров этого пучка и параметров коллимирующей электромагнитной структуры.

N.D. BUKHARSKII, PH.A. KORNEEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ON THE POSSIBILITY OF COLLIMATING ACCELERATED CHARGED PARTICLE BEAMS WITH THE MAGNETIC FIELDS EXCITED IN “SNAIL” TARGETS BY LASER RADIATION

The work considers a possibility of using electromagnetic structures excited in “snail” targets during their irradiation by ultrashort relativistically intense laser pulses for control of accelerated charged particle beams. Estimates of the collimation efficiency are performed for different parameters of the charged particle beam and the collimating electromagnetic structure.

В настоящее время активно развиваются методы получения пучков ускоренных заряженных частиц, электронов [1] и ионов [2], с использованием мощных лазерных импульсов в качестве драйверов. По сравнению со стандартными ускорителями подобные схемы являются значительно более компактными, поскольку напряженности ускоряющих электрических полей в данном случае оказываются значительно выше, а пространственные масштабы области ускорения – значительно меньше. В дополнение к компактности, лазерные и лазерно-плазменные источники ускоренных частиц могут существенно превосходить стандартные ускорители по полному числу частиц в пучке и заряду этого пучка [1, 2], что делает их более привлекательными для различных приложений и перспективных исследований. В то же время, однако, стоит отметить, что расходимость пучка частиц в таких схемах оказывается достаточно высокой, требуется поиск методов ее снижения.

В данной работе рассматривается возможность использования электромагнитных структур, возбуждаемых в мишнях «улитка» [3, 4] ультракороткими лазерными импульсами релятивистской интенсивности, для управления потоками ускоренных протонов. Процесс коллимации был исследован для магнитных полей с различной величиной и пространственным профилем, с учетом вклада от стационарных и переменных электрических полей, которые также создаются в области мишени в результате взаимодействия с ней лазерного импульса. Кроме того, были рассмотрены различные параметры пучка ускоренных протонов, в том числе, приближенные к реальным, которые могут быть реализованы с использованием TNSA-механизма [2].

Проведенные расчеты показали, что магнитное поле порядка $\sim(10^2 - 10^3)$ Тл, создаваемое при облучении мишени с размером $\sim(100 - 1000)$ мкм лазерным импульсом субпетаваттной мощности, позволяет коллимировать потоки протонов с энергией ~ 1 МэВ. При переходе к мультипетаваттным лазерным импульсам и уменьшении размеров мишени до $\sim(10 - 100)$ мкм величина магнитного поля может возрастать до $\sim 10^5$ Тл, что, в свою очередь, согласно расчетам, позволяет коллимировать протоны с энергией порядка 100 МэВ. Полученные результаты могут представлять интерес в контексте разработки компактных систем для генерации пучков высокоэнергетических заряженных частиц с малой расходимостью и большим зарядом пучка.

Работа поддержана Российским Научным Фондом, проект № 24-22-00402.

Список литературы

1. Rosmej O. N. et al. High-current laser-driven beams of relativistic electrons for high energy density research // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. Vol. 62. No. 11. no. 115024.
2. Roth M., Schollmeier M. Ion Acceleration—Target Normal Sheath Acceleration // CERN Yellow Reports. 2016. Vol. 1 (2016): Proceedings of the 2014 CAS-CERN Accelerator School: Plasma Wake Acceleration.
3. Ehret M. et al. Kilotesla plasmoid formation by a trapped relativistic laser beam //Physical Review E. 2022. Vol. 106. No. 4. no. 045211.
4. Bukharskii N. D., Korneev P. A. Study of a highly magnetized relativistic plasma in the context of laboratory astrophysics and particle flow control // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2023. Vol. 50. No 8. P. S869-S877.

М.П. МАЛАХОВ^{1,2}, А.М. ФЕДОТОВ¹, С.Г. РЫКОВАНОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

НЕЛИНЕЙНОЕ ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНА НА ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСЕ С ДВИЖУЩИМСЯ ФОКУСОМ

Рассмотрена методика, называемая летающим фокусом, для управления скоростью фокуса лазерного импульса. Получены электромагнитные поля в параксиальном приближении, проведено сравнение спектральных характеристик нелинейного томсоновского рассеяния электрона в зависимости от скорости и направления движения фокальной плоскости.

M.P. MALAKHOV^{1,2}, A.M. FEDOTOV¹, S.G. RYKOVANOV²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russia

NONLINEAR THOMSON SCATTERING OF AN ELECTRON BY A LASER PULSE WITH A MOVING FOCUS

A technique called a flying focus for controlling the focus speed of a laser pulse is considered. Electromagnetic fields are obtained in the paraxial approximation, and the spectral characteristics of nonlinear Thomson scattering of an electron are compared depending on the velocity and direction of motion of the focal plane.

Нелинейное томсоновское рассеяние может служить хорошим источником излучения с большим выходом фотонов, однако в сильнонелинейном режиме рассеянное излучение имеет широкие угловые и спектральные распределения. В стандартной схеме по рассеянию пучка электронов на фокусированном лазерном импульсе фокальная плоскость остается неподвижной [1]. При использовании технологии, называемой летающий фокус, оказывается возможным управлять скоростью фокуса [2] (рис. 1), что позволяет увеличить время взаимодействия электронов с лазерным импульсом и, как следствие, получать излучение с меньшей угловой и частотной расходимостью [3].

В работе изучаются спектральные характеристики излучения, рассеянного электроном при лобовом столкновении с фокусированным лазерным импульсом, фокальное положение которого движется с заданной скоростью. Из решения волнового уравнения получены электромагнитные поля летающего фокуса в параксиальном приближении. Спектрально-угловое распределение нелинейного томсоновского рассеяния численно рассчитывается с помощью обобщенного метода Филона [4]. Разработанный код позволяет выполнять расчеты для произвольных энергий электрона, а также интенсивности, поляризации, формы временной огибающей и длительности лазерного импульса.

С помощью разработанного кода исследованы спектрально-угловые распределения рассеянного излучения в зависимости от скорости и направления движения фокальной плоскости фокусированного лазерного импульса.

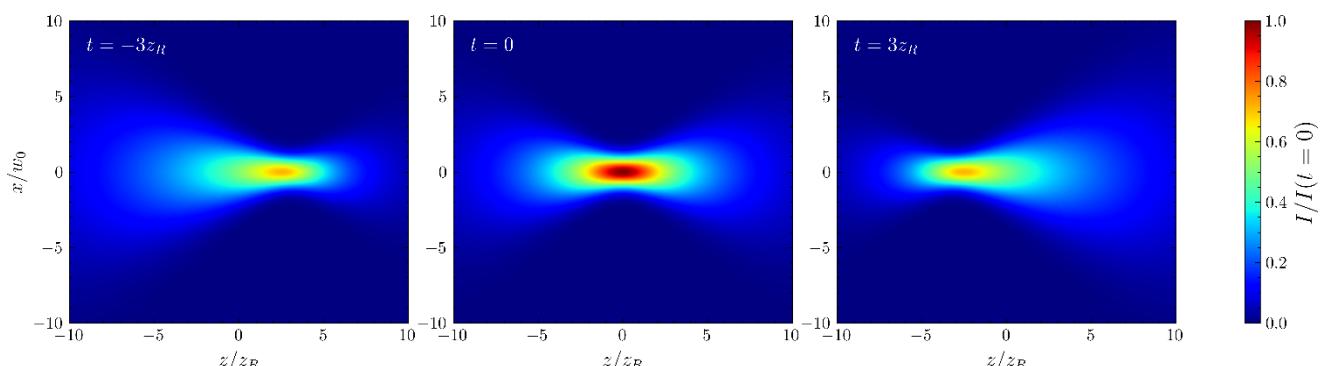


Рис. 1. Интенсивность фокусированного лазерного импульса, усредненная по быстрым осцилляциям несущей волны для моментов времени $t = -3z_R, 0, 3z_R$ ($c = 1$). Длительность импульса $T = 10z_R$, нормированная скорость движения фокуса $\beta_I = 1$ направлена противоположно распространению импульса.

Список литературы

1. Davis L. W. // Phys. Rev. A, 1979, Vol. 19, p. 1177.
2. Ramsey D. et al. // Phys. Rev. A, 2023, Vol. 107, p. 013513.
3. Ramsey D. et al. // Phys. Rev. E, 2022, Vol. 105, p. 065201.
4. Thomas A. G. R. // Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2010, Vol. 13, p. 020702

Д.И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО

Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА ДВОЙНУЮ ИОНИЗАЦИЮ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ИНТЕНСИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ

Исследовано влияние электрон-электронного взаимодействия на вероятность двукратной туннельной ионизации отрицательного иона брома Br⁻ в поле интенсивного униполярного лазерного импульса, исключающего эффект перерассеяния. С помощью численного решения нестационарного уравнения Шредингера для двухэлектронного одномерного и двумерного иона брома в импульсах различной длительности исследованы возможность коллективного туннелирования двух электронов и применимость одноэлектронного приближения для описания двойной ионизации. Показано, что электрон-электронное взаимодействие подавляет канал коллективной ионизации, однако степень этого подавления уменьшается с увеличением размерности фазового пространства. Было также показано, что учет электронных корреляций в случае коротких лазерных импульсов (~1–10 fs) может на порядок уменьшить вероятность туннелирования второго электрона по сравнению со случаем независимого туннелирования невзаимодействующих электронов. Для более длинных импульсов (~30 fs) вероятности двойной ионизации в одноэлектронном приближении и в случае взаимодействующих электронов отличаются менее чем на 1%.

D. I. TYURIN, S. V. POPRuzhenko

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

EFFECT OF ELECTRON-ELECTRON CORRELATIONS ON DOUBLE IONIZATION OF NEGATIVE IONS IN INTENSE LASER FIELDS

We consider the influence of the electron-electron interaction on the probability of double tunnel ionization of negative bromine ion Br⁻ in the field of an intense ultrashort unipolar laser pulse when the effect of rescattering is eliminated. By solving numerically the time-dependent Schrödinger equation for two-electron one- and two-dimensional bromine ion in pulses of different duration we investigate a possible channel of two-electron collective tunneling and applicability of the single-electron approximation for description of double ionization. We show that the electron-electron repulsion suppresses the collective channel, however, this suppression weakens with increasing the phase space dimensionality. We also show that electron-electron correlations in the case of short laser pulses (~1–10 fs) can reduce the probability of tunneling of the second electron by an order of magnitude compared to the independent tunneling of non-interacting electrons. For longer pulses (~30 fs), the probabilities of double ionization calculated in the single-electron approximation and in the case of interacting electrons differ by less than 1%.

Электрон-электронное взаимодействие при многократной ионизации атомов и ионов может значительно влиять на механизм ионизации и приводить к эффектам, которые не описываются в приближении невзаимодействующих электронов. Наиболее сильным эффектом, связанным с электронными корреляциями, является перерассеяние электрона на родительском ионе. В настоящее время установлено, что этот механизм вносит основной вклад в двойную ионизацию в линейно поляризованных лазерных полях [1]. Однако в циркулярно поляризованных или униполярных импульсах перерассеяние подавлено, что дает возможность изучать другие, более слабые, корреляционные эффекты. Одним из таких эффектов, обсуждаемых в литературе, является коллективное туннелирование [2]. В работе [3] было показано, что если два электрона могут туннелировать вместе как единая квазичастица, то это должно качественно изменить импульсное распределение двукратных ионов (под двукратным ионом мы понимаем здесь атомную систему, потерявшую два электрона относительно своего исходного состояния: в случае отрицательно заряженных ионов двукратный ион будет иметь заряд +1) по сравнению со случаем последовательной независимой ионизации.

В данной работе с помощью численного решения нестационарного двучастичного уравнения Шредингера мы изучаем возможность формирования такой квазичастицы в поле униполярного электромагнитного импульса. Анализ формул Переломова-Попова-Терентьева [4] для вероятности последовательной ионизации и их обобщения [2] на случай коллективной ионизации показал, что коллективный канал должен вносить наиболее сильный вклад при ионизации отрицательного иона брома. Однако численное решение нестационарного уравнения Шредингера демонстрирует, что электрон-электронное отталкивание существенно препятствует образованию квазичастицы из двух электронов, что подавляет коллективный канал ионизации. Сравнение эволюции волновой функции в случае ионизации одномерного и двумерного двухэлектронного иона брома показало, что с увеличением фазового пространства подавление канала коллективной ионизации уменьшается.

Кроме этого в работе обсуждается влияние электрон-электронного взаимодействия на применимость одноэлектронного приближения для описания последовательной ионизации. Численные расчеты показали, что в случае коротких лазерных импульсов длительностью 1–10 fs электронные корреляции могут на порядок уменьшать вероятность ионизации второго электрона по сравнению со случаем, когда туннелирование происходит независимо. Однако для более длинных импульсов (~30 fs) вероятности двойной ионизации в одноэлектронном приближении и в случае взаимодействующих электронов отличаются менее чем на 1%.

Список литературы

1. Becker W. et al. // Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. P. 1011.
2. Зон Б.А. // ЖЭТФ. 1999. Т. 116. С. 410.
3. Попруженко С.В., Ломоносова Т.А. // Письма в ЖЭТФ. Т. 113. С. 320.
4. Переломов А.М., Попов В.С., Терентьев М.В. // ЖТЭФ. 1966. Т. 50 С. 1393; Т. 51 С. 309.

Н. В. МАКАРЕНКО, С. В. ПОПРУЖЕНКО
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ТУННЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Рассматривается туннельная ионизация атомарного аргона в фемтосекундном лазерном импульсе с интенсивностью близкой к 10^{22} Вт/см² с целью исследования релятивистской динамики и излучения фотоэлектронов, высвобождаемых из ионов в лазерном фокусе. Излучение электронов, ускоренных вдоль направления распространения лазерного поля, значительно усиливается при столкновении с более слабым встречным лазерным импульсом. Показано, что угловые распределения и спектры испускаемых фотонов могут служить инструментом для определения пиковой интенсивности основного импульса в фокусе.

N. V. MAKARENKO, S. V. POPRUZHENKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

RADIATION OF RELATIVISTIC ELECTRONS CREATED THROUGH TUNNEL IONIZATION OF ATOMIC GASES IN LASER BEAMS OF EXTREME INTENSITY

We consider tunnel ionization of atomic argon in a femtosecond laser pulse of intensity close to 10^{22} W/cm² aiming at the investigation of relativistic dynamics and radiation of photoelectrons released from their parent ions in the laser focus. Radiation of the electrons accelerated along the laser field propagation direction is greatly enhanced by a collision with a weaker counter-propagating laser pulse. We demonstrate that angular distributions and spectra of emitted photons can serve as a tool for probing the main pulse peak intensity in the focus.

Разработка нового поколения фемтосекундных лазерных источников с пиковой мощностью в интервале 1-10 петаватт открывает путь к систематическим лабораторным исследованиям взаимодействия лазерного излучения с веществом при интенсивности излучения 10^{22} Вт/см² и выше. Напряженность поля и его распределение внутри лазерного фокуса являются ключевыми характеристиками, определяющими вероятности процессов нелинейной классической и квантовой электродинамики, поэтому для предстоящих экспериментов крайне важна надежная диагностика таких экстремально сильных электромагнитных полей.

Один из предлагаемых методов измерения пиковой интенсивности основан на наблюдении туннельной ионизации глубоких уровней тяжелых атомов [1]. В данной работе рассмотрен процесс, сопровождающий такой эксперимент по измерению интенсивности: после туннельной ионизации электроны ускоряются лазерным полем и излучают преимущественно в направлении распространения лазерного пучка. Спектрально-угловое распределение такого излучения зависит как от пиковой интенсивности лазера, так и от ее распределения внутри фокуса, что дает дополнительный инструмент для анализа структуры электромагнитного поля. Однако, как известно, излучение релятивистских частиц в поле внешней электромагнитной волны при попутном движении сильно подавлено [2], в результате даже в лазерном фокусе с пиковой интенсивностью $\sim 10^{22}$ Вт/см² электроны, возникшие в результате туннельной ионизации, излучают, до своего выхода из области сильного поля, всего по несколько фотонов высокой частоты. Поэтому целесообразно рассмотреть ситуацию, в которой помимо основного лазерного импульса высокой интенсивности используется пробный, распространяющийся в направлении, противоположном основному.

Начальные условия для классических траекторий фотоэлектронов определяются моментами ионизации, которые задаются случайным образом для ансамбля из 10^3 атомов аргона, распределенных в лазерном фокусе. Скорость туннельной ионизации вычисляется находится по формуле Переломова-Попова-Тереньева [3]. Образовавшиеся электроны ускоряются основным лазерным импульсом до значений гамма-фактора $\sim 10^3$ и сталкиваются со встречным слабо фокусированным пробным импульсом интенсивностью 10^{18} Вт/см². Длина волны обоих импульсов составляет 1 мкм. Основной импульс представляет собой простейший гауссов пучок с шириной поперечной перетяжки 3 мкм. Для расчета спектрально-углового распределения излучения в слабо фокусированном пробном импульсе мы воспользовались приближением плоской волны и адаптировали результаты работы [4], перейдя в систему отсчета, в которой электрон в среднем покоятся.

Результаты расчетов показывают, что угловое распределение излучения имеет вид конуса с углом раствора, зависящим от интенсивности основного лазерного пучка. Направления вылета излученных фотонов сконцентрированы в малом интервале углов вблизи образующей конуса, что связано с особенностями траекторий фотоэлектронов, начинающих движение с нулевой скоростью внутри лазерного пучка и покидающих область сильного поля в основном через боковую поверхность лазерного фокуса. Исследованы зависимости полной излученной энергии и ее спектрального распределения от максимального значения интенсивности основного пучка и поперечного размера лазерного фокуса.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №25-22-00308).

Список литературы

1. M. Ciappina, S. Popruzhenko, S. Bulanov, T. Ditmire, G. Korn, and S. Weber, Physical Review A 99, 043405 (2019).
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лишниц, Теоретическая физика. Теория поля. М. Наука, 1988.
3. В.С. Попов, УФН 174, 921 (2004)
4. E. Sarachik and G. Schappert, Physical Review D 1, 2738 (1970).

А.И. АЛЕКСЕНКО, А.В. БЕРЕЗИН, А.М. ФЕДОТОВ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАСПАД ЗАРЯЖЕННОЙ СКАЛЯРНОЙ ЧАСТИЦЫ

Рассмотрена модель распада заряженной скалярной частицы на заряженную и нейтральную скалярные частицы в сильном электромагнитном поле. Получены аналитические выражения для скорости распада, рассмотрены предельные случаи. Произведено сравнение результатов для случаев постоянного и переменного внешнего поля.

A.I. ALEXEENKO, A.V. BEREZIN, A.M. FEDOTOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE EFFECT OF A STRONG ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE DECAY OF A CHARGED SCALAR PARTICLE

A model of the decay of a charged scalar particle onto charged and neutral scalar particles in a strong electromagnetic field is considered. Analytical expressions for the decay rate are obtained, and limiting cases are considered. The results are compared for the case of a constant and time-dependent external field.

В работе рассматривается модель распада скалярной заряженной частицы на заряженную и нейтральную без кинематических приближений. Рассмотрен случай распада, разрешенного и в отсутствии поля. Расчет проведен в первом порядке теории возмущений по взаимодействию между частицами, взаимодействие с внешним электромагнитным полем – плоской циркулярно поляризованной волной – учтено точно. Влияние поля определяется безразмерными параметрами η и χ . В системе покоя начальной частицы эти параметры имеют вид: $\eta = \hbar\omega/mc^2$, $\chi = E/E_c$, где E , ω – амплитуда и частота внешнего поля, $E_c = m^2 c^3 / \hbar e$ – критическое поле КЭД [1].

Полная вероятность распада имеет вид суммы парциальных вероятностей распада начальной частицы с поглощением (испусканием) с фотонов волны $W = \sum W_s$. Для вывода асимптотических выражений было получено другое представление вероятности в виде двойного интеграла [2].

Получено выражение для вероятности распада в постоянном поле ($\eta = 0$) и его асимптотики в предельных случаях по параметру χ . В пределе слабого поля ($\chi \ll 1$) к вероятности свободного распада, помимо поправки $\propto \chi^2$, добавляется осциллирующая поправка $\propto \chi \cos(1/\chi)$; в пределе сильного поля ($\chi \gg 1$) вероятность распада независимо от масс частиц, участвующих в распаде, стремится снизу к постоянному значению $1/3$ по закону $\sim 1/\sqrt{\chi}$.

Аналогичные вычисления в случае ненулевого η показывают, что область $\chi \lesssim 1$ делится на три подобласти с разным поведением: при $\chi \lesssim \chi_{min}$ нет никаких осцилляций, при $\chi_{min} \lesssim \chi \lesssim \chi_{max}$ наблюдается сложная осцилляционная картина, связанная с накоплением стационарных точек интеграла, а при $\chi_{max} \lesssim \chi$ поведение вероятности совпадает с таковым в случае $\eta = 0$ (см. рис. 1).

Полученные результаты применимы, например, к распаду $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$.

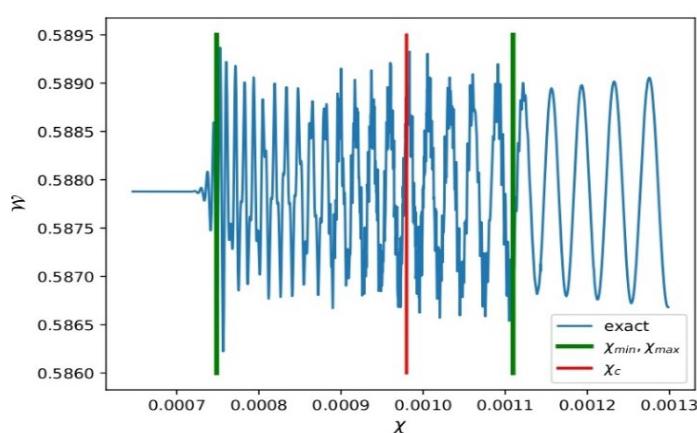


Рис. 1. Вероятность распада при $\eta = 0,001$.

Список литературы

1. Ритус В. И., Никишов А. И. Квантовая электродинамика явлений в интенсивном поле // Труды ФИАН. – 1979. – Т. 111. – С. 497-618.
2. А.И. Алексеенко, А.М. Федотов, Распад скалярной частицы в поле плоской циркулярно поляризованной электромагнитной волны, ЛаПлаз-2024: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 424.

Е. О. ДМИТРИЕВ, Ф. А. КОРНЕЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

О ПЕРЕДАЧЕ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ АНСАМБЛЮ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В рамках одночастичного приближения рассматривается поглощение момента импульса структурированной лазерной волны заряженными частицами. С помощью численного моделирования наблюдается передача момента импульса для случаев радиально и азимутально поляризованных мод Лагерра-Гаусса. Поглощенный момент импульса оказывается подавленным по сравнению со случаем суперпозиции линейно поляризованных мод Лагерра-Гаусса с различными азимутальными индексами. Отличие в величине поглощенного момента импульса может быть объяснено наличием угловой неоднородности распределения интенсивности в последнем случае.

E. O. DMITRIEV, Ph. A. KORNEEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ON THE ANGULAR MOMENTUM TRANSFER FROM STRUCTURED LASER BEAMS TO AN ENSEMBLE OF CHARGED PARTICLES

Angular momentum transfer from a structured laser wave to charged particles is considered in the frameworks of the single particle approximation. Angular momentum gain is observed in numerical simulations for the cases of radially and azimuthally polarized Laguerre-Gaussian modes. Transferred angular momentum appears to be suppressed compared to the case of the superposition of linearly polarized Laguerre-Gaussian modes with different azimuthal indexes. Discrepancy between the values of gained angular momentum may be explained as a consequence of an angular asymmetry of the intensity distribution in the latter case.

Помимо энергии и импульса, лазерные волны могут переносить момент импульса, величина которого связана с поляризацией и пространственной структурой электромагнитной волны. Задача передачи момента импульса лазерной волны веществу имеет различные приложения, такие как хранение информации, оптические пинцеты, ускорение частиц и генерация квазистационарного магнитного поля в плазме. Описание взаимодействия заряженных частиц со структурированной лазерной волной требует, вообще говоря, рассмотрения коллективных эффектов. Однако в случае разреженного вещества, например, малоплотной плазмы, одночастичное приближение, то есть пренебрежение взаимодействием частиц друг с другом, может позволить качественно описать эффекты, возникающие в процессе взаимодействия.

В рамках параксиального приближения структурированные электромагнитные волны, обладающие моментом импульса, могут быть описаны с помощью разложения по базису мод Лагерра-Гаусса. В работе [1] рассмотрено взаимодействие заряженных частиц с суперпозицией двух линейно поляризованных мод Лагерра-Гаусса с различными азимутальными индексами и построена модель поглощения момента импульса в одночастичном приближении, находящаяся в хорошем согласии с результатами численного моделирования. Однако процесс взаимодействия с более сложными конфигурациями электромагнитного поля, такими как радиально поляризованная мода Лагерра-Гаусса, рассмотренная в работе [2], остается недостаточно изученным. Аналитическое описание взаимодействия с такими полями затруднено, в частности, за счет более сложного описания самих электромагнитных волн. В данном случае, электромагнитные волны не могут быть представлены в виде суперпозиции конечного числа мод Лагерра-Гаусса, и необходимо учитывать бесконечное число слагаемых в разложении по базисным модам [3].

В данной работе радиально и азимутально поляризованные моды Лагерра-Гаусса описаны аналитически с помощью разложения по базису мод Лагерра-Гаусса. С помощью аналитических и численных методов исследовано взаимодействие заряженных частиц с радиально и азимутально поляризованными модами Лагерра-Гаусса, а также суперпозицией линейно поляризованных мод Лагерра-Гаусса с различными азимутальными и радиальными индексами.

Работа поддержана Российским Научным Фондом, проект № 24-22-00402.

Список литературы

1. Dmitriev, E. and Korneev, Ph. // Phys. Rev. A. 2024. Vol. 110. P. 013514.
2. Nuter, R., et al. // Physical Review E. 2018. Vol. 98 № 3. P. 033211.
3. Dmitriev, E., and Ph Korneev. // arXiv:2412.00272 (2024).

Е. Г. ГЕЛЬФЕР¹, Е. Е. ПЕГАНОВ², С. В. ПОПРУЖЕНКО^{2,3}

¹*ELI-Beamlines, Dolni Brezany, Czech Republic*

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

³*Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской Академии наук, Москва, Россия*

ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ В ПЛАЗМЕ, ИНДУЦИРОВАННЫЙ ГЕОМЕТРИЕЙ МИШЕНИ

Посредством PIC-моделирования исследовано взаимодействие циркулярно поляризованного лазерного импульса петаваттной мощности с плотной мишенью с цилиндрическим отверстием. Результаты расчёта показывают, что при такой постановке задачи происходит передача углового момента от электромагнитного поля частицам плазмы, которые впоследствии концентрируются вблизи оси цилиндра и генерируют сильное магнитное поле напряженностью до нескольких гига-Гаусс. При анализе зависимости полного переданного электронам момента импульса от концентрации и безразмерной амплитуды поля получено согласие с простой теоретической моделью.

E. G. GELFER¹, E. E. PEGANOV², S. V. POPRuzhenko^{2,3}

¹*ELI-Beamlines, Dolni Brezany, Czech Republic*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

³*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

INVERSE FARADAY EFFECT IN PLASMA INDUCED BY TARGET GEOMETRY

The problem of angular momentum transfer in the interaction of an intense circularly polarized laser pulse with dense targets with a cylindrical hole is considered via PIC-modeling. It is shown numerically that angular momentum absorption occurring within this scheme leads to the generation of a strong axially symmetric magnetic field with a strength up to several giga-Gauss near the cylinder axis. The scaling of the total electron angular momentum with the target density and field amplitude is found in agreement with simple theoretical considerations.

Электромагнитные поля переносят угловой момент (УМ), который можно разделить на спиновую и орбитальную части [1]. Обычно орбитальная часть циркулярно поляризованных (ЦП) пучков мала по сравнению со спиновым угловым моментом и увеличивается с ростом степени фокусировки импульса. Необратимый перенос УМ из электромагнитного поля в среду открывает путь к возбуждению сильных электронных токов, которые генерируют квазистатические магнитные поля большой напряженности.

В случае сильно нелинейного режима взаимодействия, достигаемого в полях высокой интенсивности, можно выделить несколько существенно различных механизмов передачи УМ. Для интенсивностей 10^{24} Вт/см² и выше теоретически показано, что обратный эффект Фарадея (ОЭФ), вызванный силой радиационного трения, является основным механизмом поглощения УМ и генерации магнитного поля [2]. Пиковая интенсивность порядка 10^{23} Вт/см² и несколько выше, которая потенциально может быть достигнута с помощью современных мультипетваттных источников [3, 4], недостаточна для демонстрации ОЭФ, вызванного реакцией излучения. Однако при таких и даже несколько меньших значениях интенсивности сильное магнитное поле может быть возбуждено при взаимодействии ЦП импульсов с плотными плазменными мишенями, имеющими структурированную поверхность.

В данной работе исследуется возможный механизм переноса УМ при интенсивностях $10^{22} - 10^{23}$ Вт/см². Мы рассматриваем лазерный импульс, состоящий из двух линейно поляризованных (ЛП) пучков, распространяющихся под малым углом (около 10°), и имеющих ортогональные поляризации с задержкой фазы $\pi/2$, так что в фокальном объеме результирующая поляризация поля близка к ЦП [5]. Длина волны $\lambda = 800$ нм соответствует Ti:Sapphire лазеру. Импульс взаимодействует с плазменным слоем толщиной 10λ и цилиндрическим отверстием диаметром $d = 6\lambda$. Ось цилиндра соправлена с осью распространения лазерного импульса.

Результаты выполненных посредством метода «частица-в-ячейке» (PIC) при помощи пакета SMILEI [6] показывают генерацию квазистатического продольного магнитного поля напряженностью несколько гига-Гаусс при интенсивности лазера, не превышающей 10^{23} Вт/см². Электромагнитное поле лазера, рассчитанное численно с помощью кода, близко к квазигауссовому пучку с перетяжкой $3,8\lambda$, пиковой безразмерной амплитудой $a_0 = eE_0/mc\omega = 100$ и гауссовой временной огибающей с параметром FWHM $6,9\lambda/c$. Здесь e и m — элементарный заряд и масса соответственно, E_0 — амплитуда лазерного поля, а c — скорость света. Несущая частота лазера $\omega = 2\pi c/\lambda$. Начальная плотность электронов в пластине в 90 раз больше критической плотности для такой длины волны лазера. Эти параметры соответствуют случаю, когда каждый линейно поляризованный пучок имеет энергию ≈ 100 Дж и пиковую мощность ≈ 20 ПВт.

Полученные результаты качественно согласуются с расчетами, выполненными ранее для аналогичной геометрии взаимодействия при отличающихся параметрах лазерного пучка и плазмы [7]. Предложена простая аналитическая модель описывающая механизм поглощения углового момента и позволяющая оценить эффективность этого процесса.

Список литературы

1. Jackson J., Classical Electrodynamics Wiley&Sons (1962)
2. Liseykina T.V., Popruzhenko S.V., Macchi A. New Journal of Physics 18 072001 (2016); New Journal of Physics 21 033009 (2019); European Physics Journal Plus 136 170 (2021)
3. Papadopoulos D.N. et al. High Power Laser Sci. Eng. 4 e34 (2016)
4. Yoon J.W. et al. Optica 8 630 (2021)
5. Liseikina T.V., Peganov E.E., Popruzhenko S.V. Kvantovaya Elektronika 53 2 165 (2023)
6. Derouillat J. et al. Computer Physics Communications 222 351 (2018)
7. Jiang K., Pukhov A., Zho C.T., New J. Phys 23 063054 (2021)

М. К. СТЕПАНОВ, Н. Д. БУХАРСКИЙ, Ф. А. КОРНЕЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СТРУК- ТУРИРОВАННЫХ МИШЕНЯХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОТОННОЙ ДЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Проведено численное моделирование процесса взаимодействия короткого мощного лазерного импульса с микромишенью типа «кулитка» и на основе результатов этого моделирования проведен анализ экспериментальных данных протонной дефлектометрии. Получены пространственно-временные профили возбуждаемых в области мишени магнитных полей, проанализированы энергетические спектры ускоренных заряженных частиц и выполнено их сопоставление с полученными в эксперименте.

M. K. STEPANOV, N. D. BUKHARSKII, PH. A. KORNEEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ANALYSIS OF THE LASER GENERATION OF STRONG MAGNETIC FIELDS IN STRUCTURED TARGETS BASED ON PROTON DEFLECTOMETRY DATA

Interaction of a short intense laser pulse with a “snail” micro-target was studied using numerical modeling and based on the modeling results, experimental proton deflectometry data was analyzed. Spatial and temporal profiles of magnetic fields excited around the target were obtained, energy spectra of accelerated charged particles were analyzed and their comparison to the experimental spectra was performed.

Взаимодействие мощного лазерного излучения с веществом является актуальной областью исследований в современной физике. В рамках данной области активно исследуются методы лазерной генерации сильных квазистационарных магнитных полей [1-6]. Лазерные источники таких полей востребованы как для решения различных практических задач, так и для проведения фундаментальных исследований, в частности, в области лазерного термоядерного синтеза и лабораторной астрофизики. Особенностью генерации магнитных полей с помощью мощных лазерных импульсов является большая скорость процесса взаимодействия и большие градиенты возбуждаемых полей, а также их импульсная электромагнитная динамика. Наиболее сложным для диагностики и анализа при этом представляется этап формирования разрядных токов.

В данной работе было проведено численное моделирование процесса возбуждения разрядов и транспорта заряженных частиц в электромагнитных полях, возбуждаемых в микромишени типа «кулитка» [7-9], получены синтетические изображения рассеянных в этих полях протонов. Проведён анализ потоков заряженных частиц, образующихся в процессе взаимодействия, и их спектров, в контексте экспериментов с подобными мишнями.

Анализ был проведён с помощью 1D и 2D моделирования процесса взаимодействия лазерного излучения с мишенью с помощью PIC-кода Smilei [10]. Были получены графики эволюции магнитного поля в мишени, его пространственный профиль при выходе на стационарный режим; величина магнитного поля в мишени, согласно расчету, составила около 200 Т. Также были проанализированы энергетические спектры заряженных частиц, ускоренных из мишени в процессе взаимодействия. Полученные данные необходимы для определения вклада потоков заряженных частиц, испущенных при воздействии лазерного излучения на мишень, в диагностические данные протонной дефлектометрии, а также для интерпретации экспериментальных результатов, позволяющих прояснить физическую картину начального этапа формирования электромагнитных структур в таких мишнях.

Список литературы

1. M. Murakami et al., Sci. Rep. 10, 16653 (2020).
2. E. C. Cnare, J. Appl. Phys. 37, 3812 (1966).
3. D. Nakamura et al., Rev. Sci. Instrum. 89, 095106 (2018).
4. O. V. Gotchev et al., Phys. Rev. Lett. 103, 215004 (2009).
5. J. P. Knauer et al., Phys. Plasmas 17, 056318 (2010).
6. M. Hohenberger et al., Phys. Plasmas 19, 056306 (2012).
7. Kochetkov I. V. et al., Sci. Rep. 12, 13734 (2022).
8. Ehret M. et al., Phys. Rev. E 106, 045211 (2022).
9. Korneev P., d'Humières E., Tikhonchuk V., Phys. Rev. E 91, 043107 (2015).
10. Derouillat J. et al., Comput. Phys. Commun. 222, 351-373 (2018).

Ю. В. СЕЛИВАНОВ, А. М. ФЕДОТОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ФИНАЛЬНОГО ЧИСЛА ЛЕПТОНОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КАСКАДЕ В ПОСТОЯННОМ СКРЕЩЕННОМ ПОЛЕ

Рассматривается обобщение модели Гайтлера в применении к электромагнитному каскаду в постоянном скрещенном поле. Получена оценка для финального числа лептонов в пределе большого значения квантового параметра.

Y. V. SELIVANOV, A. M. FEDOTOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ANALYTICAL COMPUTATION OF THE FINAL NUMBER OF LEPTONS IN ELECTROMAGNETIC CASCADE IN PRESENCE OF CONSTANT CROSSED FIELD

A generalization of the Heitler model as applied to an electromagnetic cascade in a constant crossed field. An estimate is obtained for the final number of leptons for a large value of the quantum parameter.

Электромагнитные каскады, возникающие во внешних полях, представляют большой самостоятельный интерес для исследования, как эффект квантовой электродинамики в полях высокой интенсивности [1]. Точное аналитическое описание электромагнитных каскадов во внешних полях представляет серьёзные трудности, поэтому большую актуальность имеют модельные задачи. В частности, интерес представляют аналитические оценки для финального числа лептонов.

Характерной особенностью процессов в постоянном скрещенном поле является сохранение квантового параметра. Пользуясь этим, а также экспоненциальной подавленностью процессов фоторождения электрон-позитронных пар при малых значениях квантовых параметров фотонов, мы переносим результаты обобщённой модели Гайтлера для электромагнитных каскадов в веществе [2] на случай электромагнитных каскадов в постоянном скрещенном поле. Оценка для финального числа лептонов для случая большого значения квантового параметра имеет вид:

$$N_e^{(1)} = \frac{\chi_0}{\chi_{min}} \cdot \frac{2k_{eff}}{(1 - k_{eff}) \ln(1/(1 - k_{eff})) + k \ln(2/k_{eff})},$$

где χ_0 – квантовый параметр затравочного электрона, $\chi_{min} \sim 1$ – порог фоторождения электрон-позитронных пар, k_{eff} – эффективное значение доли величины квантового параметра, передаваемой лептоном фотону при излучении.

Из рассмотрения процесса излучения в первом порядке с использованием результатов из [3] получено среднее значение доли величины передаваемого квантового параметра:

$$k \approx \frac{16}{63} - \frac{43}{49\Gamma\left(\frac{2}{3}\right)} \cdot (3\chi)^{-\frac{2}{3}}, \quad \chi \gg 1,$$

где χ – квантовый параметр излучающего лептона. При больших χ_0 мы принимаем $k_{eff} = 16/63$.

Список литературы

1. Fedotov A. et al. // Physics Reports. 2023. Vol. 1010. P. 1-138.
2. Selivanov Y. V., Fedotov A. M. // Physical Review D. 2024. Vol. 110, №. 9. P. 096022.
3. Ритус В. И. // Труды ФИАН. 1979. Т. 111. С. 5-151.

Ю.К. ГАГАРИН, Ф.А. КОРНЕЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МЕХАНИЗМ АВТОРЕЗОНАНСНОГО ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА

В работе исследовано влияние геометрического профиля внешнего магнитного поля на процесс ускорения электрона электромагнитной волной в режиме авторезонанса. Для случая гауссова распределения магнитного поля в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, получена аналитическая оценка амплитуды поля в зависимости от пространственного масштаба неоднородности в предположении, что масштаб мал по сравнению с характерным размером траектории ускоряющегося электрона. Проведено численное моделирование процесса ускорения при облучении лазерным импульсом холодной плазмы, помещенной в магнитное поле соленоида.

Y.K. GAGARIN, PH.A. KORNEEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

EFFECT OF AN INHOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD ON ELECTRON AUTORESONANCE LASER ACCELERATION

This work considers the effect of a geometric external magnetic field profile on autoresonance electron acceleration with an electromagnetic wave. Suggesting Gaussian distribution of the magnetic field in a plane perpendicular to the wave propagation direction an analytical estimate of field amplitude depending on the inhomogeneity spatial scale is obtained assuming the scale to be small compared to the trajectory size of an accelerating electron. Numerical simulations of the acceleration process are performed for the irradiation of cold plasma in a solenoidal magnetic field by laser pulse.

Авторезонансное ускорение электрона плоской электромагнитной волной в присутствии однородного постоянного магнитного поля, ориентированного вдоль направления распространения волны, подробно изучено во многих работах [1-3]. Однако реальные магнитные поля, которые могут быть получены в экспериментах [4], обладают геометрическим профилем, что может привести к существенному изменению динамики ускоряющегося электрона.

В неоднородном магнитном поле условие автоматической синхронизации циклотронной частоты электрона во внешнем поле и частоты плоской волны с учетом Доплеровского сдвига не выполняется, вследствие чего происходит дефазировка [5], ограничивающая возможность эффективного поглощения энергии электромагнитной волны ускоряющимся электроном. При оптимальном подборе параметров время дефазировки может быть увеличено за счет минимизации разности усредненных циклотронной частоты и частоты лазерной волны.

Для качественного анализа влияния неоднородности магнитного поля на процесс авторезонансного ускорения электрона рассмотрен Гауссов профиль внешнего поля в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения электромагнитной волны. Показано, что минимизация усредненной разности частот приводит к зависимости амплитуды внешнего поля от пространственного масштаба неоднородности. В приближении слабонеоднородного магнитного поля получена приближенная аналитическая оценка оптимальной амплитуды поля. Полученная аналитическая зависимость хорошо согласуется с результатами численного моделирования, если ввести в выражение для амплитуды магнитного поля коэффициент, не зависящий от пространственного масштаба неоднородности, и определяемый из численного расчета для одного произвольного значения масштаба неоднородности. Полученные оценки позволяют предсказать оптимальные параметры магнитного поля в широком диапазоне величин пространственной неоднородности, основываясь на результатах численного моделирования для одного произвольно выбранного значения масштаба неоднородности в приближении слабонеоднородного поля. Численные результаты, полученные для двух значений интенсивности лазерного импульса и двух поляризаций (линейной и циркулярной), хорошо согласуются с аналитической оценкой.

Проведены также численные расчеты формирования пучка ускоренных электронов при облучении цилиндрической мишени, помещенной в магнитное поле соленоида, фемтосекундным лазерным импульсом релятивистской интенсивности. Несмотря на наличие неоднородности магнитного поля не только в поперечном, но и в продольном направлениях, а также присутствии радиальной компоненты поля, полученные результаты свидетельствуют о возможности применения данной схемы для ускорения электронов в реалистичных магнитных полях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 24-22-00402).

Список литературы

1. Kolomenskii A.A. and Lebedev A.N. // JETP 1963. Vol. 17. P. 179.
2. Roberts C.S. and Buschbaum S.J. // Phys. Rev. 1964. Vol. 135. P. A381.
3. Faisal F.H.M., Salamin Y.I. // Phys. Rev. A. 1999. Vol. 60. P. 2505.
4. Korneev Ph., Tikhonchuk V. and d'Humières E. // New J. Phys. 2017. Vol. 19. P. 033023.
5. Милантьев В.П. // УФН 1997. Т. 167. С. 3.

М.И. ГОЗМАН

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

ЛИНЕЙНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АЛГЕБРЫ ЛИ ГРУППЫ ДИФФЕОМОРФИЗМОВ В ЧЕТЫРЁХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Предложен метод построения представлений алгебры Ли группы диффеоморфизмов в пространстве произвольной размерности. Описана общая структура пространства представления. Показано, что представление общего вида описывается набором матриц, зависящих от двух векторов. Получено уравнение для этих матриц. Получен некоторый класс решений этого уравнения в четырёхмерном пространстве. Построены представления, которые определяются этим классом решений. Показано, что среди представлений данного класса имеются такие, которые не сводятся к тензорным полям.

M.I. GOZMAN

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

LINEAR REPRESENTATIONS OF LIE ALGEBRA OF DIFFEOMORPHISM GROUP IN FOUR-DIMENSIONAL SPACE

A method is proposed for constructing representations of the Lie algebra of a group of diffeomorphisms in a space of arbitrary dimension. The general structure of the presentation space is described. It is shown that a general representation is described by a set of matrices depending on two vectors. An equation for these matrices is obtained. A certain class of solutions to this equation in four-dimensional space is obtained. Representations determined by this class of solutions are constructed. It is shown that among the representations of this class there are those that cannot be reduced to tensor fields.

Оператор инфинитезимального диффеоморфизма $x^\mu = x'^\mu + \varepsilon f^\mu(x')$ (ε — малое) на пространстве представления имеет вид

$$\tilde{L}_{x=x'+\varepsilon f(x')} = \text{id} - i\varepsilon \tilde{I}_{f(x)} = \text{id} - i\varepsilon \int dx f^\mu(x) \tilde{I}_\mu(x).$$

Операторы $\tilde{I}_{f(x)}$ — это генераторы диффеоморфизмов.

В качестве базиса пространства представления предложено использовать вектора, собственные для генераторов малых трансляций \tilde{I}_t^{tr} . Эти вектора обозначены e_{pn} , где p_t — собственные значения ($\tilde{I}_t^{\text{tr}} e_{pn} = p_t e_{pn}$), n — индекс, различающий базисные элементы с одинаковыми p . Индекс n принимает M различных значений, и число M называется мультиплетностью представления.

Вводятся операторы $\tilde{I}_\mu(\Delta)$, которые, действуя на элементы базиса e_{pn} , меняют их собственные значения p_t :

$$\tilde{I}_\mu(\Delta) e_{pn} = \sum_{m=1}^M (A_\mu{}^{p+\Delta})_n^m e_{p+\Delta,m}.$$

Коэффициенты $(A_\mu{}^{p+\Delta})_n^m$ удобно представить в виде матриц размером $M \times M$. Для них получено уравнение

$$A_\mu{}^{p+\Delta} A_\tau{}^{p+\Delta+\Delta'} - A_\tau{}^{p+\Delta'} A_\mu{}^{p+\Delta+\Delta'} = \Delta_\tau A_\mu{}^{p+\Delta+\Delta'} - \Delta'_\mu A_\tau{}^{p+\Delta+\Delta'}.$$

Доказано, что матрицы $A_\mu{}^q_p$ полностью определяют представление алгебры Ли группы диффеоморфизмов.

В четырёхмерном пространстве получен класс решений этого уравнения:

$$A_0{}^q_p = M_0^0 + \sum_{\beta=1}^3 s_\beta M_0^\beta, \quad A_\alpha{}^q_p = \frac{\Delta_\alpha}{\Delta_0} M_0^0 + M_0^\alpha + \sum_{\beta=1}^3 s_\beta \left(\frac{\Delta_\alpha}{\Delta_0} M_0^\beta + M_\alpha^\beta \right),$$

где $\Delta_\mu = q_\mu - p_\mu$, $s_\beta = \frac{p_\beta q_0 - p_0 q_\beta}{\Delta_0} - 1$, а матрицы M_μ^σ зависят только от p_0 и q_0 . Получены формулы для матриц M_μ^σ .

Показано, что в них входит семь постоянных матриц, которые были названы порождающими. Получены условия, которым должны удовлетворять порождающие матрицы.

Показано, что такие представления, как скалярное и векторное поля, относятся к данному классу. Получены несколько новых представлений данного класса, которые не сводятся к тензорным полям.

Список литературы

1. Goldin G. Lectures on diffeomorphism groups in quantum physics // Contemporary Problems in Math. Physics. 2004. P. 3 – 93.
2. Вершик А. М., И. М. Гельфанд И. М., Граев М. И. Представления группы диффеоморфизмов // УМН. 1975. Т. 30. С. 3 – 50.
3. Mann K. The structure of homeomorphism and diffeomorphism groups // Notices of the American mathematical society. 2021. Vol. 68, №4. P. 482 – 492.

Д. О. КОНДАУРОВ, Е. А. ПОЛЯКОВ
Российский Квантовый Центр, Москва, Россия

ДИССИПАТИВНАЯ ДИНАМИКА ОТКРЫТЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ В СЛУЧАЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрен общий вид динамики открытой квантовой системы, приводящей в классическом пределе к системе уравнений на средние, соответствующей броуновскому движению. Показано, что в квантовом случае не существует вполне положительного марковского отображения, строго воспроизводящего эту систему. На примере модели Кальдейры-Леггета показано влияние квантовых эффектов на диссипативную динамику.

D. O. KONDAUROV, E. A. POLYAKOV
Russian Quantum Center, Moscow, Russia

DISSIPATIVE DYNAMICS OF OPEN QUANTUM SYSTEMS IN THE CASE OF BROWNIAN MOTION

The general form of the dynamics of an open quantum system, leading in the classical limit to a system of equations for averages corresponding to Brownian motion is considered. It is shown that in the quantum case there is no completely positive Markov map that strictly reproduces this system. Using the Caldeira-Leggett model as an example, the influence of quantum effects on dissipative dynamics is shown.

Описание открытых квантовых систем осуществляется с помощью уравнений на эволюцию частичной матрицы плотности. Физическая корректность этих уравнений математически соответствует условию вполне положительной определённости соответствующего отображения. Особый интерес представляет случай марковской динамики. В этом случае существует наиболее общий вид корректного уравнения — уравнение Линдблада. В классическом случае примером такой эволюции является броуновское движение, однако в квантовом случае, оказывается, не существует уравнения Линдблада, приводящего к известным уравнениям на средние для броуновского движения без дополнительных квантовых поправок.

В работе показано, что строго линейная диссипация в квантовом случае невозможна, в частности, она приводит к нарушению принципа неопределенности. Линейная диссипация может быть реализована только при наличии дополнительного механизма, который обеспечивает сохранение минимального фазового объёма, например температуры. В случае конечной температуры требование вполне положительной определённости приводит к необходимости наличия дополнительного квантового вклада в уравнение на средний квадрат координаты, обратно пропорционального температуре.

Рассмотрена модель Кальдейры-Леггета, в которой термостат представлен как набор независимых осцилляторов, взаимодействие с открытой системой описывается линейным по координатам частицы и осцилляторов слагаемым. В классическом случае эта модель в марковском пределе, что соответствует бесконечной ширине частотного диапазона осцилляторов окружения, приводит к классическим уравнениям броуновского движения. В квантовом случае нулевые колебания осцилляторов оказывают существенное влияние на динамику. Возникает дополнительный вклад в энергию частицы, неограниченно растущий с увеличением частоты обрезки, что делает в квантовом случае невозможным строго марковский предел. Также возникает дополнительная диффузия, пропорциональная энергетическому вкладу нулевых колебаний.

Таким образом, в работе показаны существенные особенности линейной диссипации, проявляющиеся при переходе к квантовому случаю.

Список литературы

1. A. O. Caldeira and A. J. Leggett, “Path integral approach to quantum Brownian motion”, Physica A 121, 587 (1983)
2. H. Grabert, P. Schramm, and G. -L. Ingold, “Quantum Brownian motion: The functional integral approach”, Phys. Rep. 168, 115 (1988)
3. B. L. Hu, J. P. Paz, and Y. Zhang, Phys. Rev. D 45,2843 (1992)
4. H. P. Breuer and F. Petruccione, Theory of Open Quantum Systems (Oxford University Press, Oxford, UK, 2002)
5. L. Ferialdi, Phys. Rev. A 95, 020101(R) (2017)
6. B. Vacchini, Phys. Rev. Lett. 84, 1374 (2000)

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ХОНГА-ОУ-МАНДЕЛА ДЛЯ ВЗАЙМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧАСТИЦ

В работе рассматривалась система с двухфотононной нелинейностью, для которой была получена зависимость глубины и формы провала Хонга-Оу-Мандела (т.н. НОМ-провала) от спектральных функций испускаемых фотонов для произвольного коэффициента светоделителя. Исследовалось влияние амплитуды нелинейности на форму НОМ-провала.

E.V. SKIRDOVA, N.S. VORONOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

HONG-OU-MANDEL INTERFERENCE FOR INTERACTING PARTICLES

This work addresses the effects of quantum interference in a system with two-photon nonlinearity. We obtain the dependence of the depth and shape of the Hong-Ou-Mandel dip (HOM-dip) on various spectral functions of emitted photons for an arbitrary beam-splitter coefficient. The influence of the amplitude of two-photon nonlinearity on the shape of the HOM-dip is investigated.

НОМ-эффект (эффект Хонга–Оу–Мандела) — это квантовое явление, при котором вероятность одновременного обнаружения двух идентичных фотонов в разных выходах светоделителя становится нулевой [1], если временная задержка между фотонами отсутствует, что проявляется в характерном "провале" (НОМ-дип) на графике вероятности одновременного срабатывания двух детекторов.

В работе рассматривается схема, где в качестве «нелинейного светоделителя» используется система двух оптических волноводов с участками, на которых электроны могут взаимодействовать и туннелировать между волноводами (см. рис. 1(a)). Материальной реализацией взаимодействующих фотонов могут служить, например, экситонные поляритоны, реализующиеся в полупроводниковых структурах. Гамильтониан системы, включающий члены для свободного движения (кинетической энергии) фотонов, туннелирования J и нелинейности U , был представлен в виде матрицы на выбранном базисе состояний.

Аналитические выражения для вероятностей детектирования (обнаружения фотонов на выходе из двух соответствующих волноводов a и b , см. рис. 1(b)) были вычислены для произвольных спектральных функций частиц, значений амплитуды нелинейности и коэффициента отражения «светоделителя». Показано, что форма и глубина НОМ-провала значительно зависят от начального спектрального распределения частиц. С увеличением амплитуды нелинейности глубина провала уменьшается, что отражает влияние взаимодействия частиц на двухчастичную интерференцию. Полученные результаты (рис. 1(b)) в предельных случаях совпадают с известными результатами, включая случай нулевой задержки испускаемых фотонов [2] и случай отсутствия нелинейных членов гамильтониана системы [1].

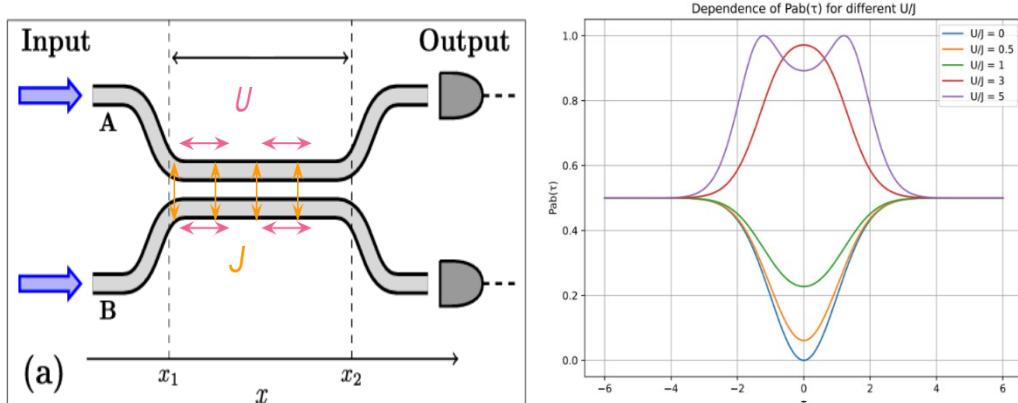


Рис.1(а) Рассматриваемая схема из двух волноводов

Рис.1(б) Вероятность детектирования фотонов на выходе из разных волноводов

В дальнейшем планируется интерпретация результатов для больших значений нелинейности (U/J), а также сравнение аналитических выводов с численным моделированием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» в рамках научного проекта № 24-1-2-22-3.

Список литературы

1. A. Branczyk, HOM Interference, pitp, (2017).
2. D. Nigro, V. D'Ambrosio, D. Sanvitto, D. Gerace, Integrated quantum polariton interferometry, Commun. Phys. **5**, 34 (2022).

Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ¹, В.В. МАРИНЮК¹, Д.Б. РОГОЗКИН²

¹Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Духова (ВНИИА)

СИЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА В УСЛОВИЯХ СОХРАНЕНИЯ ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Из уравнения Бет-Солптера получена система самосогласованных диффузионных уравнений для пропагатора плотности энергии и коэффициента диффузии электромагнитных волн в случайному ансамбле частиц в условиях медленного затухания циркулярной поляризации. Вычислены длина локализации и коэффициент прохождения света в оптически длинном волноводе.

E.E.GORODNICHEV¹, V.V. MARINYUK¹, D.B. ROGOZKIN²

¹National Research Nuclear University "MEPhI"

²Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)

STRONG LOCALIZATION OF LIGHT UNDER CONDITIONS OF CIRCULAR POLARIZATION MEMORY

Based on the Bethe-Salpeter equation, a system of self-consistent diffusion equations is obtained for the energy density propagator and the diffusion coefficient of electromagnetic waves in a random ensemble of particles under conditions of circular polarization memory. For an optically long waveguide, the localization length and the transmission coefficient of light are calculated.

Диффузия волн различной природы в рассеивающих средах с низкой размерностью (Q1D и 2D) по мере увеличения толщины образца сменяется режимом сильной (андерсоновской) локализации [1]. Считается, что локализация связана с интерференцией волн, распространяющихся по обращенным во времени траекториям. Это предположение лежит в основе самосогласованной теории локализации, предложенной в [2]. При теоретическом описании локализации электромагнитного поля в существующих работах [3] используется предположение, что нарушение диффузии излучения происходит в условиях полной деполяризации, когда рассеяние волн можно описывать в скалярном приближении. В средах, в которых распространение волн происходит в условиях медленного затухания циркулярной поляризации [4], возможна ситуация, когда диффузия излучения нарушается на длине, сопоставимой с длиной деполяризации. В этих условиях уже нельзя не учитывать векторную природу света. В работе получены уравнения самосогласованной теории сильной локализации электромагнитных волн в оптически толстом непоглощающем образце с неоднородностями произвольного размера. При резонансном Ми-рассеянии в окрестности первой точки Керкера эти уравнения имеют вид

$$\nabla_{\vec{r}} [D(\vec{r}) \nabla_{\vec{r}} I(\vec{r}, \vec{r}')] = -\delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad \nabla_{\vec{r}} [D(\vec{r}) \nabla_{\vec{r}} V(\vec{r}, \vec{r}')] - \sigma_{dep} V(\vec{r}, \vec{r}') = -\delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad \frac{1}{D(\vec{r})} = \frac{3}{\ell_{tr}} + \frac{3\pi}{k_0^2 \ell_{tr}} [I(\vec{r}, \vec{r}) + V(\vec{r}, \vec{r})] \quad (1)$$

где $D(\vec{r})$ - коэффициент диффузии, ℓ_{tr} - транспортная длина свободного пробега, k_0 - волновое число, $I(\vec{r}, \vec{r})$ и $V(\vec{r}, \vec{r})$ - скалярная и циркулярная моды, соответственно. Уравнения (1) справедливы при выполнении условия слабого беспорядка $k_0 \ell_{tr} \ll 1$. Предполагается, что минимальный линейный размер образца L_{min} превышает транспортную длину $L_{min} \gg \ell_{tr}$. Уравнения (1) обобщают результаты скалярной теории [5,6] и позволяют найти коэффициенты диффузии и прохождения электромагнитных волн через длинный Q1D-волновод.

При прохождении света через цилиндрический волновод с неоднородным профилем показателя преломления в поперечном сечении может быть выполнено условие медленного затухания циркулярной поляризации [7]. В работе рассмотрен модельный многомодовый цилиндрический волновод, в который помещены резонансные Ми-рассеиватели и выполнено первое условие Керкера. Решение системы (1) даёт для коэффициента прохождения следующий результат

$$T = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \sqrt{\frac{\ell_{tr}}{\ell_{dep}}} \cdot \exp(-L/2\ell_{loc}) \quad (2)$$

где $\ell_{loc} = Ak_0^2 \ell_{tr} / 6\pi$ - длина локализации для скалярных волн [4], ℓ_{dep} - длина затухания циркулярной поляризации [4,8], A - поперечное сечение волновода. В случае скалярных волн коэффициент прохождения равен $T^{(sc)} = (\sqrt{3}/4) \cdot \exp(-L/\ell_{loc})$.

Список литературы

1. F. Evers, A.D. Mirlin, Rev. Mod. Phys. **80**, 1355 (2008).
2. D. Vollhardt, P. Wolfle, in *Electronic Phase Transitions*, Elsevier Science, Amsterdam, (1992), p.1.
3. E. Akkermans, G. Montambaux, *Mesoscopic physics of electrons and photons*, Cambridge, University Press, 2007.
4. Е.Е. Городничев, А.И. Кузовлев, Д.Б. Рогозкин, Письма в ЖЭТФ, **68**, 21 (1998).
5. B.A. van Tiggelen, A. Lagendijk, D.S. Wiersma, Phys.Rev. Lett. **84**, 4333 (2000).
6. N. Cherroret, S. E. Skipetrov, Phys.Rev. E, **77**, 046608 (2008).
7. V. S. Liberman, and B.Ya. Zel'dovich, Phys. Rev. A **46**, 5199 (1992).
8. Е.Е. Городничев, А.И. Кузовлев, Д.Б. Рогозкин, Письма в ЖЭТФ, **104**, 155 (2016).

А. ГРУДИНИНА, М. ПОСАЖЕНКОВ, Н. ВОРОНОВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ ТУННЕЛИРОВАНИЯ НА ДЕФЕКТЕ ДЛЯ БОЗЕ-КОНДЕНСАТОВ В ГЕОМЕТРИИ РАЗОРВАННОГО КОЛЬЦА

Работа посвящена оценке константы туннелирования для кольцевых бозе-конденсатов с барьером в рамках формализма энергетического функционала Гросса–Питаевского. Получены аналитические выражения в предельных случаях узкого и широкого барьера. Для оценки константы туннелирования проводится фитирование численной зависимости значения энергетического функционала от разности фазы на барьере с помощью параметров потенциала вида «стиральной доски».

A. GRUDININA, M. POSAZHENKOV, N. VORONOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

TUNNELING CONSTANTS FOR SPLIT RING-SHAPED BOSE CONDENSATES WITH A DEFECT

We estimate the tunneling constants for a ring-shaped Bose condensate depending on barrier geometry, employing the Gross–Pitaevskii energy functional formalism. Analytical limiting cases of thin and wide barriers are studied. The tunneling constants are further obtained from fitting the numerically obtained dependencies of the functional value on the barrier phase difference with the parameters of «washboard-like» potential.

В работе изучается количественная зависимость константы (энергии) туннелирования квазидномерных бозе-конденсатов в геометрии разорванного кольца E_{tun} в потенциале вида $E_{kin}(\Delta\phi)^2 - E_{tun} \cos \Delta\phi$, где $\Delta\phi$ – разность фазы на барьере (т.е. потенциал вида «стиральной доски»), от параметров барьера. Потенциал вида «стиральной доски» позволяет описывать состояние системы с точки зрения положения в минимумах энергетического функционала в конфигурационном пространстве.

Рассмотрены аналитические предельные случаи, а именно: (1) случай узкого барьера ширины d меньше длины залечивания ξ , так что волновая функция конденсата не успевает измениться на масштабах d , а барьер можно считать дельта-функциональным; и (2) случай широкого барьера, когда его ширина много больше длины залечивания, что позволяет рассматривать область под барьером в квазиклассическом пределе. Подобная классификация барьера применялась при изучении одномерной сверхтекущей жидкости при обтекании препятствия [1].

В случае узких барьера $d < \xi$ найдено аналитическое решение уравнения Гросса–Питаевского с периодическими граничными условиями (похожий случай был исследован в [2,3] в контексте стабильности решений для цепочек холодных атомов). Проведен анализ характерных масштабов энергии поляритонной системы в уравнении Гросса–Питаевского, и показано, что (i) в квазидномерной задаче доминирующим слагаемым будет нелинейное слагаемое, и (ii) величина E_{tun} зависит от разности фазы на барьере и числа намотки фазы на кольце n и имеет вид $E_{tun} \sim \left[\frac{2\hbar^2}{mR^2} + 2(\alpha - g) \frac{\xi^2}{R^2} \right] \frac{2\pi n - \Delta\phi}{(2\pi)^2}$, где R – радиус кольца, m – масса частицы, α – высота дельта-барьера, g – характерный масштаб нелинейности.

В случае широких барьера была проведена сшивка нелинейной конденсатной волновой функции в пределе Томаса–Ферми вне барьера и квазиклассической волновой функции под барьером, как было предложено в работе [4] для случая стандартного двухъямного потенциала. Подобное рассмотрение позволяет учесть нелинейность задачи в подбарьерных волновых функциях, а энергия туннелирования будет определяться перекрытием хвостов волновой функции под прямоугольным барьером высоты U_0 : $E_{tun} \sim \left[\frac{\hbar^2}{2mR^2} \frac{(2\pi n - \Delta\phi)^2}{(2\pi)^2} + U_0 - \mu \right] \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \Psi_L(\theta) \Psi_R(\theta)$, где вид волновой функции под барьером слева (справа) $\Psi_{L(R)}(\theta)$ дается громоздкими выражениями, полученными из сшивки, $\theta_{1,2}$ – положение границ барьера, μ – химический потенциал.

Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант № 24–22–00426 (<https://rscf.ru/project/24-22-00426/>).

Список литературы

1. J. Huynh, M. Albert, and P.-E. Larre, Phys. Rev. A 105, 023305 (2022)
2. Axel Perez-Obiol and Taksu Cheon, Phys. Rev. E 101, 022212 (2020)
3. Axel Perez-Obiol, Juan Polo, and Taksu Cheon, Phys. Rev. A 102, 063302 (2020)
4. F. Dalfovo, L. Pitaevskii, and S. Stringari, Phys. Rev. A 54, 4213 (1996)

С.С. ОНУЧИН, Я.С. ЛЯХОВА
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

УЧЁТ КВАНТОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРА ПОРЯДКА В СИСТЕМАХ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФЕРМИОНОВ

Разработан метод флюктуирующего локального поля для учёта квантовых флюктуаций в многочастичных квантовых системах. Проведена апробация метода, развитого вокруг среднеполевого приближения в хаббардовской цепочке для учёта флюктуаций в антиферромагнитном канале. Построена температурная зависимость магнитной восприимчивости и спектральные функции для различных температур. В работе показано, что предложенная схема позволяет значительно улучшить результаты родительского приближения, сохраняя при этом его сравнительную простоту.

.S. ONUCHIN, Ya.S. LYAKHOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ACCOUNTING FOR QUANTUM FLUCTUATIONS OF ORDER PARAMETER IN SYSTEMS OF CORRELATED FERMIONS

A fluctuating local field method has been developed to account for quantum fluctuations in multiparticle quantum systems. The method developed on the mean-field approximation in the Hubbard chain has been tested to account for fluctuations in the antiferromagnetic channel. The temperature dependence of the magnetic susceptibility and spectral functions for different temperatures were obtained. The paper shows that the proposed scheme can significantly improve the results of the initial approximation, while maintaining its comparative simplicity.

Описание флюктуационных явлений в коррелированных системах остаётся сложной задачей физики многочастичных квантовых систем. Несмотря на широкий спектр известных вычислительных методов в этой области, вопрос о создании схемы, одновременно простой и дающей хорошие результаты в широком диапазоне параметров, остаётся открытым. Одним из последних перспективных методов является метод флюктуирующего локального поля (FLF) [1]. Одной из центральных идей метода является усреднение статистической суммы по ансамблю внешних полей, которые вводятся искусственно в соответствии с учитываемым каналом флюктуаций. На примере антиферромагнитных флюктуаций в одномерной цепочке Хаббарда из N узлов преобразование FLF может быть записано в виде:

$Z = \text{const} \int \exp \left(-S_h - \frac{\beta N}{2\lambda} (\mathbf{v} - \lambda \mathbf{s})^2 \right) D[c^+, c] d^3 \mathbf{v}$, где \mathbf{v} - классическое флюктуирующее поле, S_h - действие для системы во внешнем поле \mathbf{h} , а параметр λ остаётся произвольным. Поле, введенное таким образом, обеспечивает эффективное уменьшение взаимодействия в системе, что позволяет строить по нему теорию возмущений.

Данная работа посвящена развитию метода для учёта квантовых флюктуаций параметра порядка. С этой целью поле \mathbf{v} разложено по мацубаровским частотам. В предположении малости вклада последующих в разложении мод относительно нулевой для обратной температуры β имеем: $v^\alpha = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} v_n^\alpha e^{iw_n \tau} \approx v_0 + v_1 e^{iw_1 \tau} + v_{-1} e^{iw_{-1} \tau}$, где $w_n = \frac{2\pi n}{\beta}$.

На рисунках 1, 2 представлены результаты расчётов для магнитной восприимчивости и спектральной функции, полученные в указанном приближении.

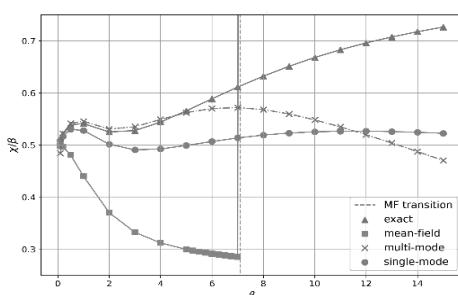


Рис. 1. Температурная зависимость магнитной восприимчивости в различных приближениях для хаббардовской цепочки (4 узла)

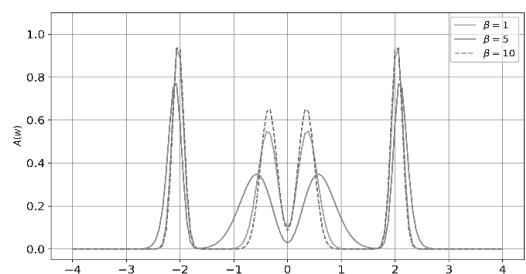


Рис. 2. Спектральная функция для хаббардовской цепочки (4 узла) при различных температурах в приближении нулевой моды

По полученным результатам можно видеть заметное увеличение точности по сравнению с родительским методом. Также новый метод позволяет исключить фазовый переход, невозможный в данной системе, но возникающий при применении метода среднего поля. Всё это даёт основания рассматривать квантовый метод FLF как перспективный подход к описанию коррелированных систем.

Список литературы

1. A. N. Rubtsov, Fluctuating local field method probed for a description of small classical correlated lattices, Phys. Rev. E 97 (2018). Ya.S. Lyakhova, S.D. Semenov, A.I. Lichtenstein, and A.N. Rubtsov, Fluctuating field series: towards calculations of correlated systems with high accuracy, Phys. Rev. B 110 (2024)

Е.Р. СЛЕПЦОВА¹, И.Л. КУРБАКОВ², Н.С. ВОРОНОВА¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), Троицк, Москва, Россия

БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИЯ В МАЛЫХ ЭКСИТОННЫХ КЛАСТЕРАХ

Строится теория, описывающая бозе-эйнштейновскую конденсацию (БЭК) в кластерах из нескольких экситонов, т.е. в мезоскопических системах, где число частиц не является большим, а может быть и мало (3, 4, 5 частиц). Получено аналитическое выражение для нормальной одночастичной матрицы плотности. Произведена проверка теории путем сравнения с численным моделированием методом Монте-Карло для различных видов потенциалов парного взаимодействия.

E.R. SLEPTSOVA¹, I.L. KURBAKOV², N.S. VORONOVA¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²Institute for Spectroscopy RAS, Troitsk, Moscow, Russia

BOSE-CONDENSATION IN A FEW EXCITONS CLUSTERS

In this work, we develop the theory of Bose-Einstein condensation (BEC) in clusters of several excitons, i.e. for mesoscopic systems where the number of particles isn't large (down to 3, 4, 5 particles). We have analytically derived the normal one-body density matrix. The theory is verified by comparison with numerical simulation using the Monte Carlo method for various interaction potentials.

В последнее время эксперименты по наблюдению БЭК экситонов ведутся в двумерных системах на основе различных полупроводниковых гетероструктур. В силу наличия беспорядка в реалистичных системах при (умеренно) малых плотностях возбуждения и температуре происходит локализация экситонов на примесях, и система разбивается на более мелкие подсистемы размером от 10 нм до 1 мкм. При фиксированной частоте внешней накачки в каждом из кластеров образуется когерентный бозе-конденсат [1]. Существует несколько теорий, основанных на гидродинамическом методе в квантовой теории поля и теории Боголюбова [2,3], описывающих БЭК в макроскопической системе. В данной работе строится теория, описывающая БЭК экситонов в мезоскопических системах.

Рассматривается экситонный кластер в однородном случае. Гамильтониан системы имеет вид:

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{q}} \left(E_g + \frac{q^2}{2m} \right) \hat{Q}_{\mathbf{q}}^+ \hat{Q}_{\mathbf{q}} + \frac{1}{2S} \sum_{\mathbf{q}, \mathbf{q}', \mathbf{q}''} U(\mathbf{q}') \hat{Q}_{\mathbf{q}}^+ \hat{Q}_{\mathbf{q}'}^+ \hat{Q}_{\mathbf{q}+q'} \hat{Q}_{\mathbf{q}-q''}, \text{ где } \hat{Q}_{\mathbf{q}} = \frac{1}{\sqrt{2S}} \int e^{-\frac{i}{\hbar} \mathbf{q} \cdot \mathbf{r}} \hat{\Psi}(\mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

$\hat{Q}_{\mathbf{q}}$ – оператор уничтожения экситона с импульсом \mathbf{q} , $\hat{\Psi}(\mathbf{r})$ – оператор поля экситонов, m – масса экситона, E_g – энергия экситонной щели, S – площадь квантования. В данной системе неприменимо стандартное определение БЭК, т.к. нет возможности перейти к макроскопическому пределу. Вводится оператор поля самоорганизованной компоненты: $\hat{\Psi}_s(\mathbf{r}) = \psi_s(\mathbf{r}) + \hat{\Psi}_B'(\mathbf{r})$, где среднее $\psi_s(\mathbf{r}) = \sqrt{\rho_s}$ – параметр порядка, а $\hat{\Psi}_B'(\mathbf{r})$ – часть, ответственная за флуктуации, в приближении Боголюбова и пренебрежении нелинейностями по операторам рождения $\hat{a}_{\mathbf{p}}^+$ и уничтожения $\hat{a}_{\mathbf{p}}$. В однородном случае, стандартное преобразование Боголюбова в гамильтониане самоорганизованной компоненты без ангармонизмов дает $H = \text{const} + \sum_{\mathbf{p}} \varepsilon_{\mathbf{p}} \hat{a}_{\mathbf{p}}^+ \hat{a}_{\mathbf{p}}$, где $\varepsilon_{\mathbf{p}} = \sqrt{T_p(T_p + 2\rho_s U(\mathbf{p}))}$ – спектр возбуждений,

$$T_p = \frac{p^2}{2m} + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dp'}{(2\pi\hbar)^3} \left[\frac{U(\mathbf{p} - \mathbf{p}') + U(\mathbf{p} + \mathbf{p}')}{2} - U(\mathbf{p}') \right] N_{\mathbf{p}'}$$

$U(\mathbf{p})$ – фурье-образ взаимодействия, $N_{\mathbf{p}}$ – число частиц над самоорганизованной компонентой.

Для нормального коррелятора возбуждений имеем:

$$iG_B(\mathbf{r}, t) = \langle T[\hat{\Psi}'(\mathbf{r}, t) \hat{\Psi}'^+(\mathbf{0}, 0)] \rangle = \frac{i\hbar}{S} \sum_{\mathbf{p} \neq 0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\omega}{2\pi} e^{\frac{i}{\hbar} \mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - i\omega t} \left(\frac{u_{\mathbf{p}}^2}{\hbar\omega - \varepsilon_{\mathbf{p}} + i\delta} - \frac{v_{\mathbf{p}}^2}{\hbar\omega + \varepsilon_{\mathbf{p}} - i\delta} \right)$$

В пределе $\mathbf{p} \rightarrow \infty$ функция Грина ($\Phi\Gamma$) сшивается с $\Phi\Gamma$ асимптотического идеального газа со спектром $\varepsilon_{\mathbf{p}}$, совпадающим с $\varepsilon_{\mathbf{p}}$ при $\mathbf{p} \rightarrow \infty$ и допускающим некоторый произвол при других значениях импульса. Связывая этот асимптотический идеальный газ с нормальной (несамоорганизованной) компонентой, выделим в операторе полного поля самоорганизованную и нормальную компоненты, тогда для одночастичной матрицы плотности системы получим

$$g_1(\mathbf{r}) = iG_{tot}(\mathbf{r}, 0) = \frac{1}{S} \sum_{\mathbf{p}} \tilde{N}_{\mathbf{p}} + \rho_s \exp \left[\frac{1}{N_s} \sum_{\mathbf{p}} N_{\mathbf{p}} \left(e^{\frac{i}{\hbar} \mathbf{p} \cdot \mathbf{r}} - 1 \right) \right],$$

где $\tilde{N}_{\mathbf{p}}$ – число частиц нормальной компоненты, N_s – полное число частиц самоорганизованной компоненты. Проведено сравнение кривых $g_1(\mathbf{r})$ с численным расчетом методом Монте-Карло с различными потенциалами взаимодействия.

Список литературы

1. А. В. Ларионов, В. Б. Тимофеев, П. А. Ни [и др.] //Письма в ЖЭТФ. — 2002. — Том 75. № 11. — С. 689-694.
2. N. S. Voronova, I. L. Kurbakov, and Yu. E. Lozovik // Phys. Rev. Lett. — 2018. — Том 121. — С. 235702.
3. Yu. E. Lozovik, I. L. Kurbakov, G. E. Astrakharchik, and J. Boronat // Phys. Rev. B — 2021. — Том 103. — С. 094511.

В.И. БОНДАРЕНКО¹, М.Г. УРИН²

¹ Москва, Россия, НИЦ «Курчатовский институт»;

² Москва, Россия, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАМОВ-ТЕЛЛЕРОВСКОЙ СИЛЫ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ МАГИЧЕСКИХ МАТЕРИНСКИХ ЯДРАХ

В рамках полумикроскопической частично-дырочной дисперсионной оптической модели предложено описание распределения силы Гамов-Теллеровских возбуждений в ряде магических материнских ядер. Из сравнения вычисленной в широком энергетическом интервале силовой функции Гамов-Теллеровского резонанса в материнских ядрах ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{132}Sn , ^{208}Pb с соответствующими экспериментальными данными для каждого ядра определены интенсивность спин-изоспиновой части сил Ландау-Мигдала и величина quenching фактора.

V.I. BONDARENKO¹, M.H. URIN²

¹Moscow, Russia, NRC “Kurchatov Institute”;

²Moscow, Russia, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

ON THE DESCRIPTION OF THE GAMOW-TELLER STRENGTH IN MEDIUM-HEAVY MAGIC PARENT NUCLEI

A description of Gamow-Teller strength distribution in medium-heavy magic parent nuclei is proposed within the semi-microscopic particle-hole dispersive optical model. From a comparison of calculated in a wide excitation-energy interval the strength function of Gamow-Teller resonance in the ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{132}Sn , ^{208}Pb parent nuclei with respective experimental data, the strength of spin-isospin part of Landau-Migdal forces and quenching factor are deduced for these nuclei.

Представленная работа является непосредственным продолжением выполненного в [1] в рамках полумикроскопической частично-дырочной дисперсионной оптической модели (ЧДДОМ) исследования основных свойств Гамов-Теллеровского резонанса (ГТР) в среднетяжелых магических материнских ядрах. Одной из особенностей модели является возможность описания для указанных ядер распределения усредненной по энергии силы произвольного гигантского резонанса в широком интервале энергий возбуждения ω (включая максимум резонанса). Работа стимулирована как общим запросом экспериментаторов на теоретическое описание распределения указанной силы (см., например, [2]), так и конкретной возможностью получить систематическую информацию об интенсивности спин-изоспиновой части сил Ландау-Мигдала и о масштабе quenching-эффекта в формировании ГТР в указанных материнских ядрах, основываясь на доступных экспериментальных данных о распределении ГТ силы [3-6].

Входными данными в реализации ЧДДОМ являются реалистическое среднее поле ядра, взаимодействие Ландау-Мигдала в канале частица-дырка (ч-д) и мнимая часть интенсивности усредненного по энергии ч-д массового оператора, ответственного за фрагментационный (spreading) эффект. В работе параметры среднего поля для материнских ядер ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{132}Sn и ^{208}Pb выбраны из независимых данных (см., например, [1]), тогда как безразмерный параметр силы взаимодействия Ландау-Мигдала в спин-изоспиновом канале (параметр g'), quenching фактор Q , а также три параметра в энергетической зависимости мнимой части интенсивности ч-д массового оператора определены путем подгонки (методом χ^2) расчетной ГТ силы к соответствующей экспериментальной зависимости. Полученные величины параметра g' , quenching фактора, а также процента исчерпывания неэнергетически взвешенного правила сумм $x_{12}^{(-)}$ в рассмотренном энергетическом интервале $\omega_1 \div \omega_2$ приведены в Таблице 1 для ГТР в указанных выше материнских ядрах. Как и следовало ожидать, полученные величины искомых параметров слабо варьируются от ядра к ядру.

Таблица 1.

Материнское ядро	$\omega_1 \div \omega_2$, МэВ	g'	Q	$x_{12}^{(-)}, \%$
^{48}Ca	0,55 - 31,95	0,75	0,60	86,58
^{90}Zr	6,90 - 56,90	0,69	0,70	94,75
^{132}Sn	0,00 - 23,36	0,63	0,67	88,19
^{208}Pb	3,80 - 50,00	0,61	0,73	100,60

Проведенное исследование является также необходимым шагом в изучении эффекта тензорных корреляций в формировании ГТР и других зарядовообменных спин-мультипольных ГР в рассмотренных материнских ядрах. Предварительный подход к проблеме в рамках ЧДДОМ реализован в [7] для ГТР в материнском ядре ^{208}Pb .

Список литературы.

1. V.I. Bondarenko and M.H. Urin, Phys. Rev. C **106**, p.024331 (2022).
2. A.Bahini, R. Neveling, P. von Neumann-Cosel, et al. Phys. Rev. C **107**, 034312 (2023).
3. K. Yako, M. Sasano, K. Miki, et.al. Phys. Rev. Lett., **103**, p. 012503 (2009).
4. T. Wakasa, H. Sakai, H. Okamura, et. al. Phys. Rev. C **55**, p. 2909 (1997).
5. J. Yasuda, M. Sasano, R. G. T. Zegers, et.al. Phys. Rev. Lett. **121**, p. 132501 (2018).
6. T. Wakasa, M. Okamoto, M. Dozono, et al. Phys. Rev. C **85**, p. 064606 (2012)
7. В. И. Бондаренко, М. Г. Урин, Ядерная физика **85**, с. 187 (2022).

И.Н. БОРЗОВ^{1,2}

1) Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

2) Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, Дубна, Россия

ЗАРЯДОВЫЕ РАДИУСЫ И β -РАСПАД ИЗОТОПОВ ВБЛИЗИ МАГИЧЕСКОЙ НЕЙТРОННОЙ ОБОЛОЧКИ N=126

Представлены результаты расчетов зарядовых радиусов и β -распадных характеристик для изотопических цепочек Hg – Bi в самосогласованной теории конечных ферми-систем на основе функционала плотности энергии Фаянса DF3-a. Показано хорошее одновременное описание зарядовых радиусов, магнитных моментов, и периодов бета-распада в изученных изотопах с Z=80-83 с DF3-a функционалом. Проведено сравнение с аналогичными расчетами с релятивистскими функционалами.

I.N. BORZOV^{1,2}

1) National Research Center "Kurchatov institute", Moscow, Russia

2) Bogolubov Laboratory of Theoretical Physics, Dubna, Russia

CHARGE RADII AND β -DECAY OF ISOTOPES NEAR THE MAGIC NEUTRON SHELL N = 126

The results of calculations of charge radii and β -decay characteristics for isotopic chains of Hg – Bi in the self-consistent theory of finite Fermi systems based on the Fayans energy density functional DF3-a are presented. A good simultaneous description of charge radii, magnetic moments, and beta decay periods in the studied isotopes with Z=80-83 with the DF3-a functional is shown. A comparison with similar calculations with relativistic functionals is made.

В недавней работе [1] с помощью лазерной резонансно-ионизационной спектроскопии на установке Laser Ion Source and Trap (LIST) в ISOLDE CERN были измерены зарядовые радиусы изотопов Tl. Обнаруженный излом при пересечении магической нейтронной оболочки N = 126 аналогичен наблюдавшемуся для изотопов Hg, Pb, Bi.

Проведены систематические расчеты зарядовых радиусов [1,2] и β -распадных характеристик (T1/2, Pxn) для длинных цепочек референтных изотопов Hg – Bi в самосогласованной теории конечных ферми-систем на основе функционала плотности энергии Фаянса DF3-a. Расчет индикаторов излома в изотопической зависимости дифференциальных радиусов $\xi = \delta\langle r^2 \rangle_{128}/126 / \delta\langle r^2 \rangle_{126}/124$ согласуется с измерениями CERN [1], тогда как известные расчеты с релятивистскими функционалами [5] либо завышают значения ξ , либо приводят к Z-зависимости, противоречащей экспериментам (Рис.1). Функционал DF3-a, описывающий наблюдаемые одночастичные уровни, позволяет достичь также хорошего описания зарядовых радиусов [1,2], магнитных моментов [3], и периодов бета-распада [4] в изученных изотопах с Z=80-83. Это не удается в расчетах [5,6] из-за присущей релятивистским функционалам инверсии высокоспиновых уровней 2ng 9/2 и 1ni 11/2 вблизи N=126. Новые экспериментальные данные по радиусам и периодам бета-распада в этой области исключительно важны для тонкой калибровки энергетического функционала плотност

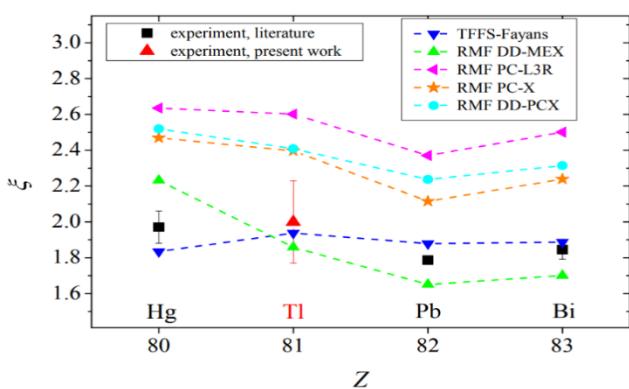


Рис. 1. Индикаторы излома зарядовых радиусов $\xi = \delta\langle r^2 \rangle_{128}/126 / \delta\langle r^2 \rangle_{126}/124$ [1,2,3] для изотопических цепочек Hg, Tl, Pb, Bi.

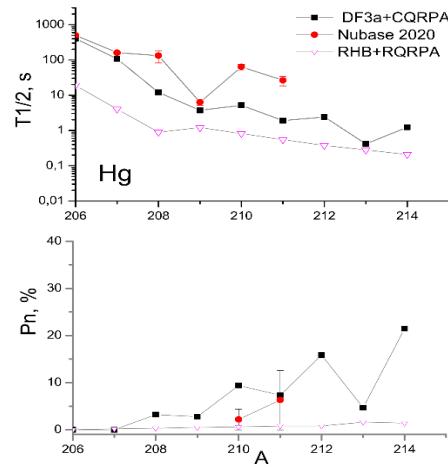


Рис. 2. Периоды β -распада и вероятности запаздывающей нейтронной эмиссии в изотопах Hg.

Список литературы

1. Yue Z., Andreyev A.N., Barzakh A.E., Borzov I.N., et. al. // Phys. Rev. C 2024. Vol. 110, P. 034315.
2. Borzov I.N., Tolokonnikov S.V. // Physics of Atomic Nuclei 2024. Vol. 87, P. 423.
3. Yue Z., Andreyev A.N., Barzakh A.E., Borzov I.N., et. al. // Phys. Lett. B 2024, Vol. 849, P. 138452.
4. Borzov I.N., Abstract - 125. Int. Conference ICPPA-2024, MEPhI, Moscow.
5. Perera U. C., Afanasjev A. V., and Ring P. // Phys. Rev. C 2023. Vol. 104, P. 064313.
6. Marketin T., Huther L., and Martínez-Pinedo G. // Phys. Rev. C 2016. Vol. 93, P. 025805.

Ф.Ф. КАРПЕШИН

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева ВНИИМ, Санкт-Петербург, Россия

ВОЗБУЖДЕНИЕ ГИГАНТСКИХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В МЮОННЫХ АТОМАХ АКТИНИДОВ

В мюонных атомах ^{238}U ядра могут претерпевать мгновенное деление, индуцированное безызлучательными переходами мюона $2p - 1s$, $3p - 1s$, $3d - 1s$ и другими. Необычные черты, проявляющиеся в мгновенном делении: увеличение барьера, динамика спуска с седловой точки к разрывной, мюонная конверсия и характеристическое рентгеновское излучение от осколков деления предоставляют многостороннюю информацию о динамике деления и свойствах осколков. В настоящем докладе предпринята ревизия теории безызлучательных переходов, исходя из первопринципов, опираясь на радиационную ширину, выделенную из полной экспериментальной ширины ГДР.

F.F. KARPESHIN

D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, Saint-Petersburg, Russia

EXCITATION OF GIANT MULTIPOLE RESONANCES IN MUONIC TRANSITIONS IN ACTINIDE ATOMS

In muonic atoms of ^{238}U , the nuclei can undergo prompt fission through non-radiative transitions of the muon: $2p - 1s$, $3p - 1s$, $3d - 1s$ etc. Main features of the fission dynamics are studied in prompt fission: augmentation of the barrier, dynamics of the saddle-to-scission descent, muonic conversion and characteristic x-rays from fission fragments supply many-lateral information on the fission dynamics and properties of the fragments. Revision of the nonradiative transition probabilities has been undertaken from the first principles, having separated the radiative width out of the total GDR width.

В мюонных атомах ^{238}U безызлучательные переходы мюона [1,2] $2p - 1s$, $3p - 1s$, $3d - 1s$ и др. могут индуцировать мгновенное деление ядра. Оно служит источником информации о динамике деления, мультипольности электромагнитных переходов и распределении заряда в осколках, структуре токов ядерных переходов. Ввиду важности соответствующих выводов, рассмотрим подобнее теоретические принципы расчета вероятностей безызлучательных переходов.

Исходя из первопринципов, я выражаю вероятность безызлучательного возбуждения ядра в мюонном переходе через сечение фотовозбуждения и коэффициенты резонансной конверсии γ -лучей на мюоне [3]. Особое внимание уделяется трактовке гигантского дипольного резонанса (ГДР) с разделением его полной ширины на парциальные: escape- и spreading-ширины [4]. В итоге достигается удовлетворительное согласие с экспериментом [2] для ширин безызлучательных переходов $2p - 1s$ и $3d - 1s$. Более того, расчет показывает, что и вероятность безрадиационного E3-перехода $3d - 2p$ достигает 15%. В этом переходе происходит возбуждение низколежащего электрического октупольного резонанса (LEOR) с энергией 3,5 МэВ. В то же время вычисленная ширина безызлучательного перехода $3p - 1s$ оказывается в 15 раз больше экспериментальной – см. таблицу. Я провожу подробный анализ этого обстоятельства на основе работы [5]. Во-первых, вычисленное уширение $3p - 1s$ -перехода обусловлено не только увеличением вклада безызлучательного перехода, но и учета того обстоятельства, что примесный уровень ГДР также имеет свою огромную по сравнению с атомными ширину порядка МэВ, которая также дает вклад. Во-вторых, имеет место обычное удвоение уровней из-за смешивания. При этом вторая излучательная компонента имеет ширину порядка МэВ, определяемую полной шириной ГДР. Более того, ядро возбуждается, собственно говоря, не в переходе $3p - 1s$, а в предшествующем каскадном переходе к этому состоянию, типа $4d - 3p$, даже $3d - 3p$ (виртуально) или другом подобном. Соответственно, в эксперименте на месте этих переходов должны проявляться недостающие интенсивности.

Таблица. Экспериментальные данные по вероятностям безызлучательных переходов в сравнении с расчетами. $\langle 2p - 1s \rangle$ означает усреднение по компонентам тонкой структуры. Обозначения SC, VC показывают применение моделей поверхностного или объемного ядерного тока соответственно, примененных для расчета коэффициентов резонансной конверсии

	$\langle 2p - 1s \rangle$	$2p_{1/2} - 1s$	$2p_{3/2} - 1s$	$3p - 1s$	$3d - 1s$
Experiment [2]	26.2 ± 2.6	$21.6 \pm 3.2(1.6)$	$31.1 \pm 2.8(1.3)$	88.9 ± 4.3	12.8 ± 1.4
Zaretsky & Novikov	22.4	21.1	24.2	64.7	
Teller & Weiss	20.7	20.0	21.7	59	9.6
Karpeshin & Nesterenko [3]	$11 - 15^{\text{SC}}$ $19 - 26^{\text{VC}}$			$55 - 65^{\text{SC}}$ $57 - 69^{\text{VC}}$	$19 - 24^{\text{SC}}$ $25 - 32^{\text{VC}}$

Список литературы

1. Balatz M.Ya., Kondrat'ev L.N., Landsberg L.G. and others // Zh. Exp. Teor. Fiz. 1960. Vol. 38. P. 1715.
2. Haenscheid H., David P., Foiger H. and others // Z. Phys. A – Hadrons and Nucl. 1992. Vol. 342. P. 111.
3. Karpeshin F.F. and Nesterenko V.O. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1991. Vol. 17. P. 705.
4. Bondarenko V.I. and Urin M.H. // Phys. Rev. C. 2024. Vol. 109. P. 064610.
5. F.F. Karpeshin, I.M. Band, M.B. Trzhaskovskaya and M.A. Listengarten // Phys. Lett. B. 1996. Vol. 372. P. 1.

М.Л. ГОРЕЛИК¹, М.Г. УРИН²

1) ЧОУ-гимназия "Московская экономическая школа", Москва, Россия

2) Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СВОЙСТВА ИЗОСКАЛЯРНЫХ ГИГАНТСКИХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕ-ТЯЖЁЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В рамках полумикроскопической частично-дырочной дисперсионной оптической модели предложено описание свойств изоскалярных гигантских мультипольных резонансов в ядре ^{142}Nd . Некоторые результаты сравниваются с полученными недавно для этого ядра экспериментальными данными.

M.L. GORELIK¹, M.H. URIN²

1) Moscow Economic School, Russia

2) National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

PROPERTIES OF ISOSCALAR GIANT MULTIPOLE RESONANCES IN MEDIUM-HEAVY SPHERICAL NUCLEI: A SEMI-MICROSCOPIC DESCRIPTION

Within the semi-microscopic particle-hole dispersive optical model, a description of the properties of the isoscalar giant multipole resonances in the ^{142}Nd nucleus is proposed. Some results are compared with experimental data obtained recently for this nucleus.

Посвящается памяти Б.А. Тулупова

В рамках полумикроскопической частично дырочной дисперсионной оптической модели (ЧДДОМ), сформулированной более десяти лет назад и успешно использованной для описания ряда изовекторных и изоскалярных гигантских резонансов (ГР) в средне-тяжелых магических ядрах (работы [1, 2] и ссылки в этих работах), предлагается количественная интерпретация основных характеристик ряда изоскалярных мультипольных ГР в средне-тяжелых сферических ядрах. К указанным резонансам относятся изоскалярные ГР с мультипольностью $L = 0 - 3$, а также обертоны изоскалярных монопольного и квадрупольного ГР (ИСГМР2 и ИСГКР2, соответственно). В связи полученным недавно экспериментальными данными [3] объектом исследования выбрано полумагическое ядро ^{142}Nd . В рамках ЧДДОМ, для каждого из упомянутых шести ГР в указанном ядре (по алгоритмам, изложенным в [1]) вычислены основные (усредненные по энергии) характеристики: 1) силовая функция, отвечающая подходящему пробному оператору; 2) двойная и однократная ("проектированная", то есть отвечающая пробному оператору) переходные плотности; 3) парциальные и полные вероятности прямого одно-нуклонного распада. Перечисленные характеристики рассматриваются в широком энергетическом интервале, включающем энергию максимума ГР. Первые две характеристики отвечают коллективному аспекту формирования ГР, включающему большое (порядка $A^{2/3}$) число нуклонов. По этой причине, в описании указанных характеристик эффектом спаривания нуклонов в ядрах с незаполненными оболочками можно пренебречь с приемлемой точностью. Вычисленные для ядра ^{142}Nd силовые функции ИСГМР и ИСГКР в окрестности максимума этих резонансов хорошо согласуются с соответствующими величинами, полученными в [3], из анализа сечений (α, α') -реакций с возбуждением изоскалярных ГР. Следует отметить, что упомянутый анализ выполнен в [3] с использованием независящей от энергии (однократной) переходной плотности коллективной модели. Существенные отличия расчётной и "экспериментальной" силовых функций получен для ИСГКР2 (в работе [3] этот резонанс был идентифицирован впервые). Представляется, что указанные отличия связаны с использованием в [3] некорректного пробного оператора. (Выбор подходящего оператора изложен в [1]). Продолжение исследования включает как анализ вероятностей прямого одно-нуклонного распада изоскалярных ГР в ядре ^{142}Nd , так и описание упомянутых ГР в ядрах ^{58}Ni и ^{120}Sn .

Список литературы

1. Gorelik M.L., Shlomo S., Tulupov B.A., and Urin M.H. // Phys. Rev. C 2021. Vol. 103, P. 034302; Phys. Rev. C 2023. Vol. 108, P. 014328.
2. Bondarenko V.I. and Urin M.H. // Phys. Rev. C 2022. Vol. 106, P. 024331; Phys. Rev. C 2024. Vol. 109, P. 064610.
3. Abdullah M., Bagchi S., Harakeh M.N., et. al. // Phys. Lett. B 2024, Vol. 855, P. 138852.

**Секция
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ**

Руководитель секции – д.ф.-м.н. Борисюк Петр Викторович

Секретари секции – к.ф.-м.н., ассистент каф. №78
Курельчук Ульяна Николаевна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9914
E-mail: UNKurelchuk@mephi.ru

А. С. БОИМ^{1,2}, В.И. ВАСИЛЬЕВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АМОРТИЗАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ МОБИЛЬНОГО ВОДОРОДНОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ

Разработана компьютерная модель и проведена оптимизация амортизационной платформы, применяемой для виброзащиты водородного мобильного стандарта частоты (ВМСЧ). С помощью метода конечных элементов проведен численный расчет параметризованной задачи влияния ударов и вибраций, испытываемых при транспортировании ВМСЧ по неидеальным поверхностям путей перемещения. Проведена экспериментальная оценка эффективности амортизационной платформы.

A.S. BOIM^{1,2}, V.I. VASILIEV²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²Russian Research Institute of Physicotechnical and Radiotechnical Measurements

EFFICIENCY OF THE LOCAL HYDROGEN FREQUENCY STANDARD PLATFORM DAMPING

A computer model of a shock-absorbing platform has been developed and optimization of the shock-absorbing platform used for vibration protection of the hydrogen frequency standard (HFS) has been carried out. Using the finite method, the parameters of the parameterized problem of industrial shocks and vibrations experienced during the transportation of the HFS on non-ideal surfaces and travel paths have been calculated. An experimental assessment of the effectiveness of the shock-absorbing platform has been carried out.

Водородные мобильные стандарты частоты (ВМСЧ) чувствительны к внешним механическим воздействиям [1].

В работе проведена оптимизация конструкции амортизационной платформы ВМСЧ. Для этого были созданы компьютерные модели амортизационных платформ с различным числом пружин и их расположением, а, так же с различными жесткостью, коэффициентом демпфирования. Исследовано их поведение при различных воздействиях.

Колебания платформы, при воздействии на неё синусоидальной вибрацией на разных частотах, представлены на рисунке 1а. Подобная система является фильтром низких частот.

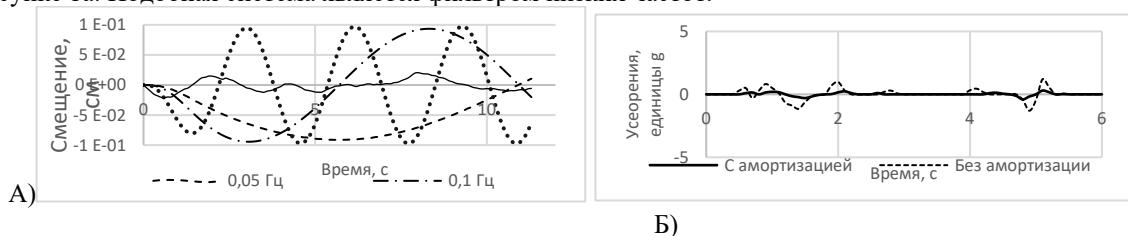


Рис.1. А – Графики смещения объекта от времени по вертикальной оси под действием вертикальной силы, меняющейся по гармоническому закону с разной частотой, Б – Графики зависимости ускорений от времени, полученные с акселерометра находящегося: 1) на амортизационной платформе – сплошная линия; 2) на тележке без виброзащиты - пунктир

Были проведены испытания с тестовым образцом. Амортизационная платформа, с установленным на неё ВСЧ подвергалась ударному воздействию. Ускорения, испытываемые ВСЧ измерялись установленным на нем акселерометром, и передавались через WiFi на компьютер, где обрабатывались. После проводились аналогичные испытания, но без использования амортизационной платформы. Одна из полученных зависимостей приведена на рисунке 1Б.

В качестве коэффициента эффективности K_{eff} было выбрано отношение модуля максимального ускорения системы без виброзащиты A_0 к модулю ускорения системы с виброзащитой A [2]: $K_{eff} = A_0/A$, которое является обратной

величиной к коэффициенту динамичности: $K = \frac{\sqrt{\lambda_0^4 + 4w^2\omega^2}}{\sqrt{(\lambda_0^2 - \omega^2)^2 + 4w^2\omega^2}}$, где $\lambda_0^2 = c/m$, $2W = b/m$, m – масса амортизируемого прибора, c – коэффициент жесткости амортизатора, b – коэффициент демпфирования, ω – частота колебаний.

Наиболее эффективной платформой была выбрана версия с 28 пружинами, 12 сверху и 16 снизу. Её расчётный коэффициент эффективности $K_{eff1} = 4,1 \pm 1,0$. Для других конфигураций он оказался ниже.

На основе экспериментальных данных рассчитан реальный коэффициент эффективности собранной амортизационной платформы. $K_{eff2} = 3,8 \pm 0,6$. Коэффициент совпал с теоретическим, с учетом погрешности, что говорит об адекватности компьютерной модели и возможности использовать её в дальнейшем.

Список литературы

1. В.П. Сысоев, Ю.С. Самохвалов, В.И. Васильев, В.П. Нагирный, Н.И. Нестеров, Д.А. Парёхин, С.Н. Овчинников. Малогабаритный активный водородный стандарт частоты - «Альманах современной метрологии» № 4 (32) 2022, стр. 8–17
2. Коловский М.З. Нелинейная теория виброзащитных систем. — М.: Наука, редакция физико-математической литературы, 1966. — 317 с.

Д.В. БОРТКО, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ, В.А. ШИЛОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРОПУСКАНИЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ ТОНКИМИ НАНОКЛАСТЕРНЫМИ ПЛЁНКАМИ ИЗ НАНОЧАСТИЦ ТАНТАЛА

Проведены эксперименты по измерению пропускания излучения широкого ИК диапазона тонких плёнок (от 26 до 48 нм) из наночастиц тантала различного размера (от 1.5 до 7.5 нм), напылённых на кремниевую подложку методом магнетронного распыления мишени с последующим захоронением наночастиц под тонким слоем CaF₂. Измерения проводились с помощью двух спектрометров, общий рабочий диапазон которых составляет от 500 до 2600 нм. Получены спектральные коэффициенты пропускания нанокластерных плёнок в диапазоне от 1000 до 2500 нм для разных размеров кластеров тантала.

D.V. BORTKO, P.V. BORISYUK, O.S. VASILYEV, V.A. SHILOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

IR TRANSMISSION OF THIN TANTALUM NANocluster FILMS

Experiments were conducted to measure the transmission of radiation in a broad IR range through thin films (26 to 48 nm) made of tantalum nanoparticles of various sizes (1.5 to 7.5 nm), deposited on a silicon substrate using DC magnetron sputtering, followed by encapsulation of the nanoparticles under a thin layer of CaF₂. Measurements were carried out using two spectrometers with a combined operational range of 500 to 2600 nm. Spectral transmission coefficients of nanocluster films were obtained in the range of 1000 to 2500 nm for different tantalum cluster sizes.

Исследование пропускания ИК-излучения через нанокластерные плёнки из тантала является актуальным в контексте разработки новых материалов с заданными оптическими характеристиками для применения в области оптоэлектроники, ИК-фильтрации, а также в системах тепловизионного и детектирующего оборудования. Использование наночастиц позволяет существенно модифицировать оптические свойства плёнок, а проведение измерений в широком диапазоне длин волн способствует оптимизации их эксплуатационных параметров, что имеет важное значение для дальнейших инноваций в этих областях.

В данной работе исследуется пропускание излучения широкого ИК-диапазона (от 1000 до 2500 нм) через образцы с тонкими плёнками (от 26 до 48 нм), состоящими из нанокластеров тантала, имеющих размеры от 1.5 до 7.2 нм. Толщина плёнок контролируется по разработанной ранее методике с использованием кварцевого микробаланса. Образцы представляют собой трёхслойную структуру, первым слоем которой является кремниевая подложка (460 мкм), вторым слоем – тонкая нанокластерная плёнка тантала с фиксированным размером кластеров, полученная методом магнетронного распыления, а третий слой – это тонкая плёнка CaF₂, нанесённая методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Напыление третьего слоя необходимо для предотвращения контакта нанокластеров с атмосферой и их последующего окисления. В связи с тем, что фторид кальция является оптически прозрачным в ИК-диапазоне, а толщина напыляемой плёнки мала (~20 нм), нанокластеры тантала оказываются инкапсулированы под ней, при этом сохраняется возможность исследовать их оптические свойства в ИК-диапазоне.

Для измерения пропускания используются два спектрометра ASP-IR-2.6 и ASP-IR-1.7 (ООО "Авеста-Проект", Россия) с рабочими диапазонами 500 – 1700 нм и 900 – 2600 нм соответственно. Для определения спектральных коэффициентов пропускания измеряются спектры пропускания излучения через образцы с плёнками, через чистую кремниевую подложку и исходный спектр излучения. Также проверяется, что тонкий слой CaF₂, нанесённый на кремний, не вносит видимых изменений в спектр пропускания подложки, что позволяет подтвердить сделанное ранее предположение о возможности исследования оптических свойств нанокластеров тантала, покрытых защитным слоем. В качестве источника излучения используется образец керамики, нагретый до 1500 °C в трубчатой печи RT 30-200/15 (Nabertherm GmbH, Германия), моделирующий спектр излучения Планка с максимумом интенсивности на длине волн около 1600 нм. При этом свет от источника фокусируется на образце с помощью линз для ИК-диапазона таким образом, чтобы покрывать площадь напылённой плёнки.

Основной целью данной работы является определение спектральных коэффициентов пропускания ИК-излучения в широком диапазоне для тонких нанокластерных плёнок тантала и анализ зависимости этих коэффициентов от размера частиц, из которых создаётся плёнка. Установление этой зависимости позволит в дальнейшем более точно прогнозировать и контролировать оптические свойства нанокластерных материалов для различных применений в ИК-технологиях.

Список литературы

1. Bortko D. V. et al. Investigation of the Optical Properties of Tantalum Oxide Nanocluster Films in the Infrared Range //Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Т. 85. – №. 12. – С. 2115-2121.
2. Alsaad A. M. et al. Optical band gap and refractive index dispersion parameters of boron-doped ZnO thin films: A novel derived mathematical model from the experimental transmission spectra //Optik. – 2020. – Т. 211. – С. 164641.
3. Tian Y. et al. Near-infrared optics of nanoparticles embedded silica thin films //Optics express. – 2019. – Т. 27. – №. 4. – С. A148-A157.
4. Kim R. et al. Metal nanoparticle array as a tunable refractive index material over broad visible and infrared wavelengths //ACS Photonics. – 2018. – Т. 5. – №. 4. – С. 1188-1195.
5. Khlebtsov N. G., Trachuk L. A., Mel'nikov A. G. The effect of the size, shape, and structure of metal nanoparticles on the dependence of their optical properties on the refractive index of a disperse medium //Optics and spectroscopy. – 2005. – Т. 98. – С. 77-83.

М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, С.А. ЗИБРОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ,
В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ДВУХЧАСТОТНАЯ СВЧ-МОДУЛЯЦИЯ ТОКА НАКАЧКИ ДИОДНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

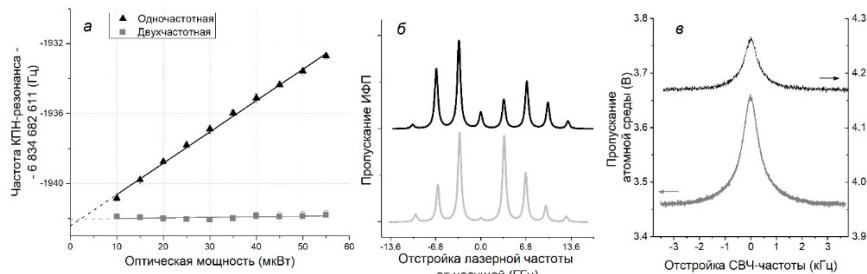
В квантовых стандартах частоты, использующих бихроматическое лазерное излучение, часто применяются диодные лазеры в режиме СВЧ-модуляции тока накачки. Применение метода двухчастотной СВЧ-модуляции позволяет повысить метрологические характеристики в случае КПН-стандарта и стандарта оптического диапазона на основе внутридиодлеровского резонанса.

M.I. VASKOVSKAYA, D.S. CHUCHELOV, E.A. TSYGANKOV, S.A. ZIBROV, V.V. VASSILIEV,
V.L. VELICHANSKY
Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DUAL MICROWAVE FREQUENCY MODULATION OF THE DIODE LASER INJECTION CURRENT FOR QUANTUM FREQUENCY STANDARDS

In quantum frequency standards using bichromatic laser radiation, diode lasers in the microwave modulation of the pump current mode are often used. The use of the method of dual-frequency microwave modulation allows improving the metrological characteristics in the case of a CPT standard and a standard based on Doppler-free resonance.

Стандарт частоты на основе эффекта когерентного пленения населеностей (КПН) [1] является перспективным инструментом для применения в задачах синхронизации, в которых габариты и энергопотребление имеют критическое значение. Недавно была продемонстрирована схема регистрации высококонтрастного внутридиодлеровского (ВД) резонанса с помощью бихроматического излучения, представляющая интерес для разработки малогабаритного оптического стандарта частоты [2]. В обоих случаях для формирования требуемого спектрального состава излучения может использоваться диодный лазер в режиме СВЧ-модуляции тока накачки, в котором лазерное излучение становится полихроматическим. Для регистрации опорного резонанса обычно используются первые боковые спектральные компоненты. Метрологические характеристики опорных КПН- и ВД-резонансов определяются в значительной степени видом спектра излучения, который для реальных лазеров отличается от идеального спектра ЧМ-сигнала. Для управления видом спектра излучения нами был предложен метод двухчастотной СВЧ-модуляции [3].



Rис. 1. а – Зависимость частоты КПН-резонанса от мощности излучения для двух типов СВЧ-модуляции. б – Спектры излучения при одночастотной (3.4 ГГц) и двухчастотной (3.4 и 6.8 ГГц) модуляции тока накачки лазера. в – КПН-резонансы, соответствующие двум типам СВЧ-модуляции, при мощности излучения 40 мкВт.

В работе показано, что применение двухчастотной модуляции обеспечивает нулевой световой сдвиг частоты КПН-резонанса в атомах ^{87}Rb , даже если это недостижимо при одночастотной модуляции (рис.1, а), что происходит за счет снижения мощности несущей компоненты спектра излучения (рис.1, б). Кроме того, обеспечивается в 2-3 раза больший контраст КПН-резонанса (рис.1, в) благодаря выравниванию мощностей первых боковых компонент спектра. Данные изменения характеристик резонанса могут обеспечить улучшение как кратковременной, так и долговременной стабильности частоты резонанса.

Также в работе обсуждается влияние соотношения первых боковых компонент спектра излучения на амплитуду ВД-резонанса. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10134 (<https://rscf.ru/project/24-72-10134/>).

Список литературы

1. V. Shah, J. Kitching // Adv. At. Mol. Opt. Phys. 2010, Vol. 59, P.21-74.
2. Hafiz M.A. et al. // Optics Letters. 2016. Vol. 41, № 13, P. 2982-2985.
3. Bogatov A. P. et al. //Optics Letters. 2022. Vol. 47, №. 24, P. 6425-6427.

А.Э. КАДЫРОВ, Д.С. КУПАЛОВ, Е.И. ИВАНЧЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЦЕЗИЕВОГО РЕПЕРА ЧАСТОТЫ ФОНТАННОГО ТИПА

Рассмотрены особенности применения лазерно-оптической системы в составе цезиевого репера частоты фонтанного типа. В ходе проведённой модернизации разработана модульная конструкция системы, обеспечивающая захват, охлаждение и подброс атомного облака, а также детектирование квантовых состояний.

А.Е. KADYROV, D.S. KUPALOV, E.I. IVANCHENKO

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

FSUE VNIIFTRI, Mendeleev, Moscow reg., Russia

MODERNIZATION OF THE LASER-OPTICAL SYSTEM OF THE CAESIUM FOUNTAIN TYPE FREQUENCY REFERENCE

Specialties of using of the laser-optical system as part of caesium fountain frequency reference are considered. During the modernization, modular construction of the system, ensuring the capture, cooling, and launching of the atomic cloud, as well as the detection of quantum states, was developed.

Для того чтобы эффективно организовать повседневную жизнь, коммуникации и координацию действий необходимо точное измерение времени. Однако для задач навигации, космических, геодезических и многих исследований в области фундаментальной физики необходимо определение времени с очень высокой точностью.

В настоящее время одним из наиболее точных видов стандартов частоты являются стандарты частоты на основе холодных атомов, используемые во многих лабораториях по всему миру. В России цезиевый репер частоты фонтанного типа (МЦР) входит в состав государственного эталона времени и частоты ГЭТ-1 2022 и воспроизводит единицы времени и частоты согласно международному определению в системе СИ[1]. Точность воспроизведения единиц времени и частоты цезиевым фонтаном имеет прямое влияние на точность эталона в целом.

Для работы стандартов частоты на основе фонтана холодных атомов, к которым принадлежит рассматриваемый цезиевый репер частоты, необходимо использовать системы, формирующие лазерные пучки.

В работе представлена модернизированная лазерно-оптическая система (СЛО), предназначенная для захвата атомного облака, его охлаждения, подброса и детектирования квантовых состояний. Система разработана с учётом используемой в модернизированной конструкции фонтана шестилучевой конфигурации оптической ловушки (рис. 1). В такой конфигурации, по сравнению с восьмилучевой, упрощается конструкция самой ловушки и лазерно-оптической системы.

В оптической ловушке происходят процессы охлаждения атомов (доплеровское охлаждение и сизифово охлаждение), а также подброс атомного облака.

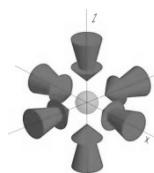


Рис. 1. Схема шестилучевой оптической ловушки.

Доплеровское охлаждение — метод лазерного охлаждения, который основан на эффекте Доплера и спонтанном комбинационном рассеянии. Если атом движется со скоростью v относительно волны, то видимая им частота:

$$f = \begin{cases} f_L \cdot (1 + v/c), & \text{для встречной волны,} \\ f_L \cdot (1 - v/c), & \text{для догоняющей волны.} \end{cases}$$

За один акт переизлучения фотона атом теряет скорость $\Delta v = h/M\lambda$. Предельно достижимая температура $T_{Dop.} = \hbar\Gamma/2k_B = h/2\tau k_B$. Для цезия $T_{Dop.} = 125,6$ мК.

Сизифово охлаждение является результатом взаимодействия атомов с градиентом поляризации, создаваемым двумя лазерными пучками. Предельно достижимая температура $T_R = h^2/k_B M \lambda^2$. Для цезия $T_R = 0,198$ мК.

В ВНИИФТРИ большинство аналогичных систем размещается непосредственно на оптических столах, что приводит к большим габаритам и трудностям в сборке. Существуют наработки по созданию оптических систем, размещаемых в лабораторной стойке [2]. В данной работе объединяются преимущества обоих способов размещения, то есть система состоит из отдельных плит, для которых предусмотрено размещение на оптическом столе.

В работе представлены результаты разработки конструкции лазерно-оптической системы, состоящей из 5 отдельных плит: плиты мастера, репампера, делителя и двух плит АОМ, защитных кожухов для этих плит и стойки с электроникой, необходимой для функционирования СЛО.

Список литературы

1. Норец И.Б., Смирнов Ю.Ф., Глазов Е.Ю., Федотов В.Н. Результаты совершенствования Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1// Альманах современной метрологии. — Менделеево, 2022. — 3 (31). — С. 8—21.
2. Нестеров Н.И., Новоселов А.В., Хромов М.Н. Компактная лазерно-оптическая система в составе стандарта времени и частоты фонтанного типа на основе атомов рубидия // МЕТРОЛОГИЯ В XXI ВЕКЕ. Материалы VI научно-практической конференции. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2019. — С. 36—39.

А.Е. КОРОЛЬКОВ, А.С. БОРИСЕНКО, И.В. ЗАЛИВАКО, И.А. СЕМЕРИКОВ, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ,
К.Ю. ХАБАРОВА

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
Российский квантовый центр, Москва, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКУБИТНЫХ GHZ СОСТОЯНИЙ НА ЦЕПОЧКЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ ИОНОВ ДЛЯ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

Реализована подготовка пятикубитных состояний Гринбергера-Хорна-Цайлингера (GHZ) на цепочке ультрахолодных ионов $^{171}\text{Yb}^+$, захваченных в линейной ловушке Пауля. Данные состояния обладают пятикратно большей чувствительностью к отклонению фазы часового лазера от частоты опорного перехода в ионе по сравнению с одиночной частицей, что является важным шагом к реализации многоионных оптических часов, работающих за пределами стандартного квантового предела. Проведена оценка достоверности подготовки состояний.

A.E. KOROLKOV, A.S. BORISENKO, I.V. ZALIVAKO, I.A. SEMERIKOV, N.N. KOLACHEVSKY,
K.YU. KHABAROVA

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Russian Quantum Center, Moscow, Russia

MULTIQUBIT GHZ STATES PREPARATION ON ARRAY OF ULTRACOLD IONS FOR FREQUENCY STANDARDS

Preparation of 5-qubit Greenberger Horne Zeilinger (GHZ) states on the chain of ultracold $^{171}\text{Yb}^+$ ions in a linear Paul trap is implemented. Such states are five times more sensitive to the clock laser phase shift from the ion states transition frequency in comparison to a single particle. It is an important step to implementation of multi-ion optical clocks, that perform beyond standart quantum limit. States preparation fidelity is estimated.

Оптические стандарты частоты на основе ионов в ловушках отличаются высокой точностью, однако уступают, например, системам на основе нейтральных атомов в стабильности, так как обычно задействуют лишь один ион во избежание возмущения их энергетических уровней из-за кулоновского взаимодействия частиц друг с другом. В последние годы развитие данной области привело к созданию систем на основе ионных ансамблей [1], что открывает путь к существенному увеличению стабильности таких стандартов. Особенный интерес вызывает возможность преодоления стандартного квантового предела шумов, ограничивающего стабильность стандартов частоты, за счет создания квантовой запутанности между частицами в ансамбле [2].

В данной работе продемонстрирована подготовка пятикубитных GHZ состояний на цепочке ионов $^{171}\text{Yb}^+$, захваченных в ловушку Пауля. На рисунке 1 приведена зависимость четности полученных состояний, демонстрирующая пятикратно большую чувствительность к фазе анализирующего $\pi/2$ -импульса.

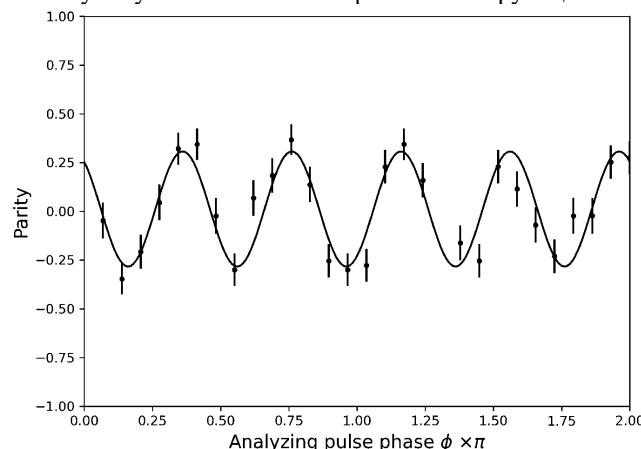


Рис. 1. Зависимость четности ансамбля из пяти ионов (вероятность найти четное количество частиц в возбужденном состоянии минус вероятность найти нечетное количество частиц в возбужденном состоянии) от фазы анализирующего $\pi/2$ -импульса, приложенного к подготовленному GHZ-состоянию.

Список литературы

1. Hausser H.N. and others // arXiv preprint 2024. arXiv:2402.16807.
2. Leibfried D. and others // Science 2004. Vol. 304, Is. 5676, P. 1476–1478.

А.В. КОХАНОВ^{1,2}, А.Э. КАДЫРОВ^{1,2}, М.Г. ГУРОВ²

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО ЭКРАНА НА СДВИГ ЧАСТОТЫ В ОПТИЧЕСКОМ СТАНДАРТЕ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ СТРОНЦИЯ-87

В работе описывается конструкция вакуумной камеры и криогенной системы, разработанной для оптического стандарта частоты. Для рассматриваемой конструкции вакуумной камеры промоделировано тепловое распределение, рассчитан тепловой сдвиг и влияние на него наличия теплового экрана.

A.V. KOHANOV^{1,2}, A.E. KADYROV^{1,2}, M.G. GUROV²

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia
FSUE VNIIFFTRI, Mendeleev, Moscow reg., Russia

EFFECT OF THERMAL SHIELD ON FREQUENCY SHIFT

IN THE OPTICAL FREQUENCY STANDARD BASED ON STRONTIUM-87

In this paper the vacuum chamber and cryogenic system designs were described. These systems were developed for the strontium optical frequency standard. For the vacuum chamber design under consideration, the thermal distribution was simulated; the thermal shift and the impact of a heatflow shield were calculated also.

Оптические стандарты частоты представляют собой перспективное направление для переопределения секунды [1]. При разработке оптического стандарта частоты на нейтральных атомах следует учитывать, что на частоту «часового» перехода действуют определенные эффекты, вызывающие сдвиг частоты, ключевым образом определяющие точность ее определения. Для оптических стандартов частоты на основе атомов ⁸⁷Sr одну из наибольших составляющих бюджета неопределенностей представляет тепловое излучение, воздействующее на охлажденные атомы. Поэтому задача по уменьшению воздействия теплового излучения на атомы и, соответственно, на сдвиги их энергетических уровней является одной из наиболее актуальных.

Наилучшая стратегия ограничения влияния теплового излучения это уменьшение теплового излучаемого потока внутренней поверхностью дополнительной внутренней камеры, охлаждаемой до криогенной температуры. В разрабатываемом стандарте используется криорефрижератор Стирлинга, который посредством медного хладопровода соединён с внутренней камерой. Поскольку внутренняя камера находится в вакуумном объёме, то конвективная теплопередача достаточно мала. Для внутренней камеры для уменьшения притока тепла от внешней вакуумной камеры и уменьшения паразитных утечек при охлаждении предлагается использовать тепловые экраны, изготовленные из полированного алюминия. Подобными экранами закрывается как хладопровод, так и сама камера.

В работе приведен пример конструкции экранов и их трёхмерные модели. Произведена оптимизация моделей всех необходимых деталей для проведения расчёта. С использованием метода конечных элементов рассчитано распределение тепловых потоков в системе для случаев установки экранов и без них. Далее проведен расчёт интегрального теплового сдвига с использованием формулы [2]:

$$\Delta\nu_{BBR}(T) = \frac{\Theta}{4\pi}\varepsilon \left[\Delta\nu_{stat} \left(\frac{T}{T_0} \right)^4 + \Delta\nu_{dyn} \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^6 \right] + O \right]$$

Для расчёта выбраны секторы размером $1^\circ \times 1^\circ$ (в сферических координатах относительно центра камеры), после чего просуммировано влияние всех конечных элементов с учётом занимаемого ими телесного угла и коэффициента испускания излучающей поверхности [3].

Получены результаты, показывающие, что при использовании теплового экранирования интегральный сдвиг частоты равен $0,957 \cdot 10^{-2}$ Гц, без экранирования — $1,068 \cdot 10^{-2}$ Гц. Данные значения позволяют сделать вывод о положительном эффекте от использования тепловых экранов и необходимости их внедрения при разработке оптических стандартов частоты с криогенным охлаждением. Качественный анализ полученных результатов позволяет сделать положительный вывод о возможности применения последовательности тепловых экранов и нанесения дополнительных отражающих покрытий.

Список литературы

1. Слюсарев С.Н. Оптические стандарты времени и частоты // Альманах современной метрологии. — Менделеево, 2016. — 3 (8). — С. 130—147.
2. Gurov M. G. Gurova E. G., Rozanov S.B., Slyusarev S.N. Species of vacuum chamber design with cryogenic cooling for strontium optical clocks // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020. — Т. 1661. — №. 1. — С. 012140.
3. Gurov M. G., Gurova E. G., Dmitriev A. K. Effect of thermal fields on the shift of optical standards of frequency // Russian physics journal. — 2015. — Т. 57. — С. 1709-1715.

О. Р. ПУТИН^{1,2}, С.А. КОЗЛОВ², Д.С. КОЛУПАЕВ², В.П. СЫСОЕВ², Н.М. ВАСИЛЬЕВ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Федерального государственного унитарного предприятия "Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений", Менделеево

³Восточно-сибирский филиал федерального государственного унитарного предприятия "Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений", Иркутск

РАСЧЁТ ДОБРОТНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Проанализированы разные способы расчета основных параметров цилиндрического резонатора с диэлектрическим заполнением для водородного стандарта частоты и времени. Выполнен аналитический расчет ненагруженной добротности трехслойной модели резонатора. С помощью моделирования в программе ANSYS HFSS получены добротности для трехслойной и полной модели резонатора. Экспериментальным путем вычислена реальная добротность. Проведено сравнение результатов.

O.R. PUTIN^{1,2}, S.A. KOZLOV², D.S. KOLUPAEV², V.P. SISOEV², N.M. VASILEV³

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements", Mendeleev

³East Siberian branch of the Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements", Irkutsk

CALCULATION OF THE Q-FACTOR OF A CYLINDRICAL RESONATOR WITH DIELECTRIC FILLING

Different methods of calculating the main parameters of a cylindrical resonator with dielectric filling for a hydrogen standard of frequency and time are analyzed. An analytical calculation of the unloaded quality factor of a three-layer resonator model is performed. Using modeling in the ANSYS HFSS program, the quality factors for a three-layer and full resonator model are obtained. The actual quality factor is calculated experimentally. The results are compared.

Стандарты частоты и времени занимают особое место в метрологии и навигации. Водородные мазеры обладают наилучшей стабильностью частоты выходного сигнала [1]. На практике важной и нетривиальной задачей является расчет характеристик резонатора водородного стандарта частоты. Поэтому разработка приближенных методов расчета параметров резонатора является актуальной задачей.

В качестве объекта для аналитического решения рассматривалась упрощенная трехслойная модель резонатора с диэлектрическим заполнением [2] (рис. 1). Уравнения для электромагнитных полей в объеме резонатора и граничные условия для них, определяют систему, решением которой является уравнение, связывающее основные параметры резонатора R_1 , R_2 , R_3 , H_p , f , ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 , μ_1 , μ_2 , μ_3 . С помощью этого уравнения можно рассчитывать размерные параметры резонатора [3], [4].

В системе MathCad написана программа, позволяющая рассчитывать значения R_1 , R_2 , R_3 при заданных остальных, а также рассчитывать ненагруженные добротность и частичные добротности резонатора.

В качестве примера, было получено значение ненагруженной добротности для резонатора с сапфировым заполнением и $R_1 = 40$ мм, $R_2 = 47$ мм, $R_3 = 83,84$ мм, $H_p = 172$ мм. $Q = 68674$.

Проведен расчет добротности трехслойной и полной модели резонатора с помощью программы моделирования ANSYS HFSS. Компьютерная модель учитывает граничные условия для полей в объеме резонатора и потери в толщине диэлектрика. Ядро программы использует методы конечных элементов для расчетов.

Получены значения для трехслойной модели (рис. 2) и полной модели резонатора (рис. 3) $Q = 68741$ и $Q = 59905$ соответственно.

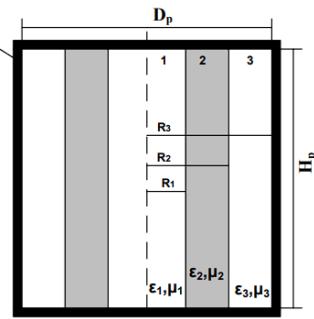


Рис. 1. Трехслойная модель резонатора

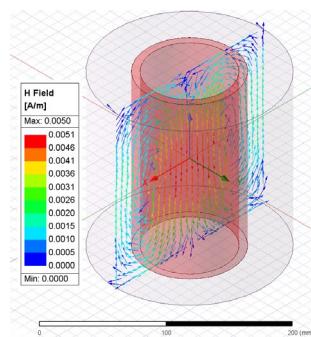


Рис. 2. Трехслойная модель резонатора в программе ANSYS HFSS

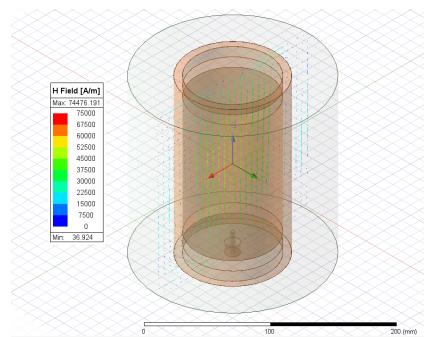


Рис. 3. Полная модель резонатора в программе ANSYS HFSS

Экспериментально велся поиск резонансной частоты, по которой рассчитывалась нагруженная добротность резонатора (полная модель). Значение резонансное частоты совпадает с частотами в аналитическом расчете и в

моделировании. Получено значение добротности $Q = 48210$, которое оказалось в 1,5 раза меньше значений, полученных в двух других методах, что и свойственно нагруженным системам.

Таким образом, в работе проведен расчет основных параметров трехслойной модели резонатора на основе сапфировой колбы в системе MathCAD, проведено моделирование трехслойной и полной модели резонатора на основе сапфировой колбы с использованием системы ANSYS HFSS и получено значение добротности полной нагруженной модели резонатора на основе экспериментальных значений. Сравнение показало совпадение результатов расчетов, проведенных аналитическим методом с использованием трехслойной модели в MathCAD, трехслойной и полной модели, смоделированной в системе ANSYS и полученного в ходе эксперимента.

Подводя итог, для теоретических расчетов можно пользоваться как приближенными методами, изложенными в статье, так и методами моделирования в программе ANSYS HFSS.

Список литературы

1. В.П. Сысоев, Ю.С. Самохвалов, В.И. Васильев, В.П. Нагирный, Н.И. Нестеров, Д.А. Парёхин, С.Н. Овчинников. Малогабаритный активный водородный стандарт частоты// «Альманах современной метрологии» № 4 (32) 2022, стр. 8–17, ФГУП «ВНИИФТРИ».
2. Русин Ф.С., Гайгеров Б.А., Пономаренко С.Ф. Расчет цилиндрического резонатора, частично заполненного диэлектриком// Измерительная техника. – 1985. - №5.
3. НИР, Методика расчета частично-заполненного диэлектриком цилиндрического резонатора и программа расчета для ЭВМ ЕС-1033// ФГУП «ВНИИФТРИ», 1983.
4. Отчет о НИР “Расчет цилиндрического резонатора частично заполненного диэлектриком (Хоз. Договор Д02-294/10)”// Кишинев, 1985.

К.М. САБАКАР^{1,2}, А.С. ФЁДОРОВ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ², М.И. ВАСЬКОВСКАЯ²,
В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}, С.А. ЗИБРОВ², Е.А. ЦЫГАНКОВ², Д.С. ЧУЧЕЛОВ²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² Физический Институт Академии Наук им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

ДВУХЧАСТОТНАЯ ВНУТРИДОПЛЕРОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ D₁-ЛИНИИ АТОМОВ ⁸⁷Rb

Исследованы внутридоплеровские резонансы поглощения бихроматического излучения после двойного прохода через ячейку с ⁸⁷Rb. Высокий контраст собственных резонансов наблюдается для ортогональных линейных поляризаций встречных полей, а перекрестного – для параллельных. Обнаружено противоположное влияние изменения интервала между частотами компонент поля на амплитуды собственных резонансов.

К.М. SABAKAR¹, А.С. FEDOROV¹, В.В. VASILIEV², М.И. VASKOVSKAYA²,
В.Л. VELICHANSKIY^{1,2}, С.А. ZIBROV², Е.А. TSYGANKOV², Д.С. CHUCHELOV²

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

² The P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

DUAL-FREQUENCY SUB-DOPPLER SPECTROSCOPY OF ⁸⁷Rb D₁-LINE

We have studied Sub-Doppler absorption resonances induced by bichromatic optical counterpropagating waves in ⁸⁷Rb. Eigen resonances have high contrast in orthogonally polarized counterpropagating waves, while crossover resonance in parallel polarized. The opposite effect of the change of frequency difference of the two field components on amplitudes of resonances has been found.

Создание малогабаритных атомных часов (МАЧ) оптического диапазона на сегодняшний день является актуальной задачей. Использование двухчастотных встречных полей с взаимно ортогональными линейными поляризациями позволило зарегистрировать высококонтрастные внутридоплеровские резонансы (ВДР) поглощения [1]. Стабильность частоты лазера, привязанного к одному из таких резонансов, составила $1 \cdot 10^{-13}$ на 1 с [2]. До сих пор большая часть работ, описывающих эти резонансы, проводилась с атомами Cs.

В докладе представлены результаты применения метода двухчастотной внутридоплеровской спектроскопии к атомам ⁸⁷Rb. Двухчастотное поле с компонентами, резонансными сверхтонким переходом D₁-линии ⁸⁷Rb, создавалось СВЧ-модуляцией тока диодного лазера с внешним резонатором. Регистрировалась зависимость пропускания ячейки с парами ⁸⁷Rb после двойного прохода от одинакового синхронного изменения частот полей. Линейная поляризация обратной волны была либо ортогональна, либо параллельна поляризации прямой волны. Контраст резонансов на собственных частотах максимальен для ортогональных поляризаций (как и в Cs), а контраст перекрестного (в Cs не наблюдался) максимальен при параллельных поляризациях. Обнаружено, что изменение частотного интервала δ_R между компонентами поля приводит к уменьшению амплитуды (A на рис.1) высокочастотного (на подуровне $F_e = 2$) и перекрестного резонансов и одновременно к увеличению их ширины (FWHM на рис. 1). Наоборот, амплитуда низкочастотного ($F_e = 1$) резонанса при изменении интервала растёт, а его ширина уменьшается, так что его метрологические характеристики улучшаются. Полученные результаты важны для создания МАЧ оптического диапазона. В докладе будет дано качественное объяснение большинства наблюдавшихся эффектов.

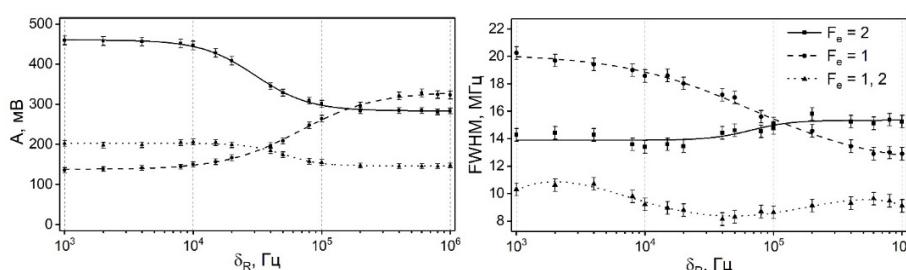


Рис. 1. Зависимости амплитуды и ширины резонансов в ⁸⁷Rb от разности оптических частот δ_R .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10134, <https://rscf.ru/project/24-72-10134/>.

Список литературы

1. Hafiz M.A. et al. // Optics Letters. 2016. Vol. 41, № 13. P. 2982-2985.
2. Gushing A. et al. // Optics Letters. 2023. Vol. 48, № 6. P. 1526-1529.

К.М. САБАКАР^{1,2}, А.С. ФЁДОРОВ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ², М.И. ВАСЬКОВСКАЯ²,
В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}, С.А. ЗИБРОВ², Е.А. ЦЫГАНКОВ², Д.С. ЧУЧЕЛОВ²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² Физический Институт Академии Наук им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРИДОПЛЕРОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ, СОЗДАННЫХ ДВУХЧАСТОТНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ В ИЗОТОПАХ ^{85}Rb И ^{87}Rb

Исследовались внутридоплеровские резонансы, созданные двухчастотными встречными оптическими полями, в атомах ^{85}Rb и ^{87}Rb . Представлены зависимости амплитуды резонансов от величины продольного магнитного поля и от разности частот оптических компонент. В этих зависимостях проявляются характерные отличия в поведении резонансов для двух изотопов.

K.M. SABAKAR¹, A.S. FEDOROV¹, V.V. VASILIEV², M.I. VASKOVSKAYA²,
V.L. VELICHANSKIY^{1,2}, S.A. ZIBROV², E.A. TSYGANKOV², D.S. CHUCHELOV²

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

² The P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF DOPPLER FREE RESONANCES PRODUCED BY BICHROMATIC OPTICAL FIELDS IN ^{85}Rb AND ^{87}Rb

We have investigated Sub-Doppler resonances produced by bichromatic counterpropagating optical waves in ^{85}Rb and ^{87}Rb atoms. Dependencies of the resonances amplitudes on longitudinal magnetic field induction and optical fields frequency difference are presented. We show and discuss differences of these dependencies for the two isotopes.

Внутридоплеровская спектроскопия во встречных двухчастотных полях линейной ортогональной поляризации позволяет регистрировать высококонтрастные резонансы поглощения в щелочных металлах [1]. Этот тип внутридоплеровских резонансов (ВДР) в щелочных металлах возникает и в результате перераспределения атомов по подуровням основного состояния, благодаря попаданию их в непоглощающие сверхтонкие (СТ) или зеемановские суперпозиционные состояния [2]. В докладе рассмотрены отличия ВДР в ^{85}Rb и ^{87}Rb , которые обусловлены, во-первых, меньшей величиной СТ-расщепления уровня $S^2P_{1/2}$ изотопа ^{85}Rb , а во-вторых, отличием моментов ядер.

Изменение разности частот резонансных компонент оптического поля от сверхтонкого расщепления основного состояния (разрушающая СТ-когерентность) приводит к уменьшению амплитуды высокочастотного (ВЧ) резонанса и увеличению амплитуды низкочастотного (НЧ) резонанса в обоих изотопах. Однако в ^{85}Rb отклик НЧ резонанса существенно меньше, чем в ^{87}Rb . Для ^{85}Rb амплитуды собственных резонансов с увеличением продольного магнитного поля (разрушающего и зеемановскую, и СТ-когерентность) затухают монотонно. В ^{87}Rb ВЧ резонанс на подуровне затухает, как и в ^{85}Rb , а НЧ резонанс на подуровне, достигает локального минимума при малых магнитных полях (40 мГс), а затем увеличивается и выходит на постоянное ненулевое значение.

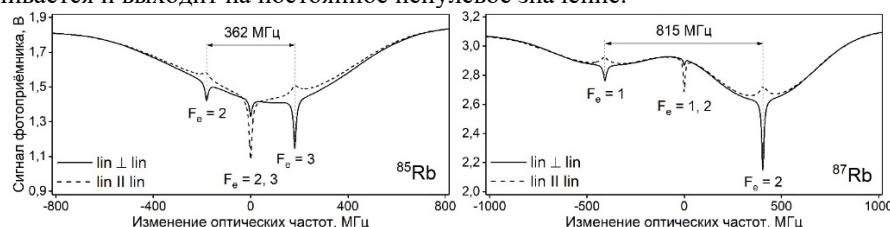


Рис. 1. Зависимости сигналов пропускания ячеек с ^{85}Rb и ^{87}Rb при сканировании оптических частот лазера.

Большие амплитуды ВЧ и перекрестного резонансов объясняются подавлением поглощения вне резонанса из-за тёмных суперпозиционных состояний. Поглощение в самом резонансе меняется слабо. Однако это простое объяснение не применимо к НЧ резонансу, поскольку его амплитуда растет при устранении темных суперпозиций. Сопоставление характеристик НЧ резонанса в двух изотопах поможет установить механизм его образования. Использование $^{85,87}\text{Rb}$ и подбор оптимальных температуры ячейки и разности оптических частот обеспечивает высокие метрологические параметры ВДР на шести частотах, стабилизация по которым может найти применения в исследованиях по вырожденным газам и квантовым вычислениям, где эти изотопы активно применяются.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-72-10134, <https://rscf.ru/project/24-72-10134/>.

Список литературы

1. Hafiz M.A. et al. // Optics Letters. 2016. Vol. 41, № 13. P. 2982-2985.
2. Hafiz M.A. et al. // New J. of Phys. 2017. Vol. 19, № 7. P. 073028.

К.К. ТРИЧЕВ, П.В. БОРИСЮК, П.А. ЧЕРЕПАНОВ, Д.О. ТРЕГУБОВ, Г. КИНТАНА АКОСТА
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗОТОПИЧЕСКИХ СДВИГОВ В МОНОИЗОТОПНЫХ ОБЛАКАХ ИОНОВ СТРОНЦИЯ

В данной работе демонстрируется измерение изотопических сдвигов охлаждающего, перекачивающего и часового перехода в моноизотопных облаках ионов стронция. Благодаря полученным данным была построена диаграмма Кинга из которой были получены константы массового и полевого сдвигов. Эти эмпирические данные могут быть использованы для улучшения расчётных методов, а знание изотопических сдвигов может быть использовано для доплеровского и субдоплеровского охлаждения четных изотопов стронция.

K.K. TRICHEV, P.V. BORISYUK, P.A. CHEREPANOV, D. O. TREGUBOV, G. Quintana Acosta
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MEASUREMENT OF ISOTOPIC SHIFTS IN MONOISOTOPIC CLOUDS OF STRONTIUM IONS

This work demonstrates the measurement of isotopic shifts in the cooling, repumping, and clock transitions in monoisotopic clouds of strontium ions. Based on the obtained data, a King plot was constructed, allowing the determination of the mass shift and field shift constants. These empirical data can be used to improve computational methods, and the knowledge of isotopic shifts can be applied to the Doppler and sub-Doppler cooling of even isotopes of strontium.

Для получения моноизотопных облаков ионов стронция-88, 86, 84 используется доплеровское охлаждения и экспериментальный подбор значений постоянного и переменного напряжения, подаваемых на стержни квадрупольной ловушки Пауля. Поскольку изотопический сдвиг охлаждающего перехода равен ~ 170 МГц, а репампера ~ 400 МГц [1] и зная резонансные частоты $^{88}\text{Sr}^+$ удалось захватить и охладить облака ионов стронция-86,84. Были получены спектры охлаждающего (рис. 1) и перекачивающих переходов.

После охлаждения моноизотопных облаков ионов стронция был возбуждён часовой переход и измерен его изотопический сдвиг. Изотопический сдвиг $^{86}\text{Sr}^+$ относительно $^{88}\text{Sr}^+$ составил ~ 570 МГц, а сдвиг $^{84}\text{Sr}^+$ относительно $^{88}\text{Sr}^+$ равен 1185 МГц. Последнее значение изотопического сдвига как нам известно было измерено впервые.

Была построена диаграмма Кинга (рис. 2) двух оптических переходов на длинах волн 422 нм и 674 нм используя значения изотопического сдвига в ионе стронция-87 [2-3]. Из диаграммы удалось получить значения массового и полевого сдвигов для часового перехода, которые равны $K_{674} = 1805$ а.е.м.ГГц, $F_{674} = 1600$ МГц/фм².

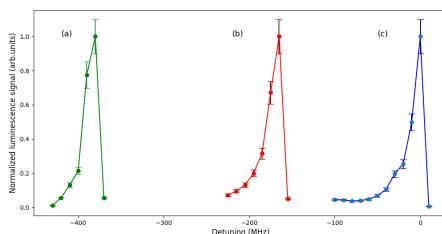


Рис. 1. Спектры охлаждающего перехода ионов изотопов стронция на длине волны 422 нм. (а) Спектр иона стронция-84, (б) иона стронция-86, (с) иона стронция-88. Нулевая Отстройка от резонанса соответствует резонансной частоте в ионе стронция-88. Нулевая отстройка соответствует резонансной частоте $^{88}\text{Sr}^+$, относительно которой определяется изотопический сдвиг других изотопов стронция.

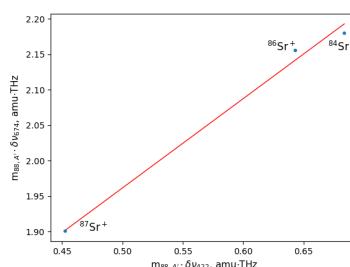


Рис. 2. Диаграмма Кинга двух оптических переходов 674 нм и 422 нм. По оси абсцисс отложен модифицированный изотопический сдвиг охлаждающего, а по оси ординат - часового перехода. Данные по $^{87}\text{Sr}^+$ были взяты в работах [17, 18]. Работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-22-0006

Список литературы

1. K. Jung *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 062401 (2017).
2. G. Borghs *et al.*, Hyperfine Interact **15**, 177 (1983).
3. G. P. Barwood *et al.*, Phys. Rev. A **67**, 013402 (2003).

Е. А. ЦЫГАНКОВ, М. И. ВАСЬКОВСКАЯ, Д. С. ЧУЧЕЛОВ, К. М. САБАКАРЬ,
 С. А. ЗИБРОВ, В. В. ВАСИЛЬЕВ, В. Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ВЫСОКОКОНТРАСТНЫЙ ОБРАЩЁННЫЙ ВНУТРИДОПЛЕРОВСКИЙ РЕЗОНАНС НА М-ТИПЕ АТОМНОГО ПЕРЕХОДА

Исследована возможность получения высококонтрастного внутридоплеровского резонанса поглощения в атомах щелочных металлов в схеме встречных монохроматических пучков лазерного излучения. Показано, что характеристики резонанса сопоставимы с получаемыми при использовании бихроматического излучения, уменьшающего сверхтонкую оптическую накачку основного состояния.

E. A. TSYGANKOV, M. I. VASKOVSKAYA, D. S. CHUCHELOV, K. M. SABAKAR,
 S. A. ZIBROV, V. V. VASSILIEV, V. L. VELICHANSKY
Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

HIGH CONTRAST INVERTED DOPPLER-FREE RESONANCE AT M-TYPE OF ATOMIC TRANSITION

A possibility to obtain a high contrast inverted Doppler-free resonance in alkali metal atoms by using counter-propagating monochromatic laser beams is investigated. Our results demonstrate that the resonance's characteristics are comparable to that of provided by bicromatic fields reducing hyperfine optical pumping in the ground state.

Спектроскопия D₁-линии атомов щелочных металлов является перспективным инструментом для разработки нового типа стандартов частоты — компактных оптических часов. Для предотвращения сверхтонкой оптической накачки используются встречные бихроматические лазерные поля. При точном оптическом резонансе взаимно ортогональные поляризации обеспечивают отсутствие непоглощающих суперпозиций подуровней основного состояния атомов. Когда частота лазера отстроена от частоты оптических переходов, поля взаимодействуют с различными скоростными группами атомов. Они индуцируют эффект когерентного пленения населённостей, что приводит к значительно меньшему уровню поглощения по сравнению с нулевой скоростной группой. Впервые эта методика была продемонстрирована в [1], обеспечивая высококонтрастные пики поглощения без доплеровского фона в атомах цезия. Однако схема с бихроматическим излучением имеет ряд недостатков, среди которых, например, необходимость использования внешнего модулятора или внешнего резонатора для эффективной СВЧ-модуляции, что увеличивает габариты квантового дискриминатора часов.

Мы показываем возможность получить обращённый высококонтрастный внутридоплеровский резонанс, используя встречные оптические поля с линейной и взаимно ортогональной поляризацией и переход F_g = I + ½ → F_e = I — ½ атомов щелочных металлов. Определено наилучшее возможное значение ядерного спина и соответствующий атомный изотоп для предлагаемой схемы. Приведён резонанс в случае встречных монохроматических пучков излучения для атомов ⁸⁷Rb, смотрите рисунок 1.

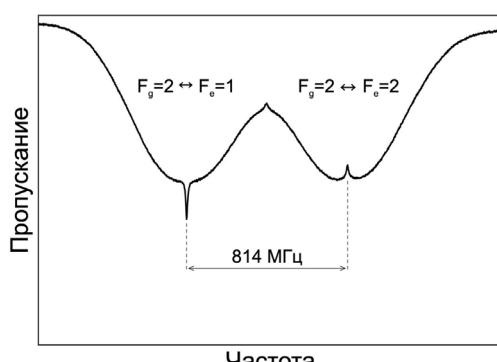


Рис. 1. Внутридоплеровский резонанс в атомах ⁸⁷Rb для случая встречных монохроматических пучков лазерного излучения с линейными ортогональными поляризациями.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10134, <https://rscf.ru/project/24-72-10134/>».

Список литературы

1. Hafiz M. A. et al. Doppler-free spectroscopy on the Cs D₁ line with a dual-frequency laser //Optics letters. – 2016. – Т. 41. – №. 13. – С. 2982-2985.

Д.С. ЧУЧЕЛОВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, К.М. САБАКАРЬ, С.А. ЗИБРОВ,
 В.В. ВАСИЛЬЕВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

РЭМСИ-КПН РЕЗОНАНСЫ В ТУШАЩИХ И ДЕПОЛЯРИЗУЮЩИХ ГАЗАХ

Исследовано влияние различных буферных газов на характеристики резонанса Рэмси-КПН в миниатюрных газовых ячейках с ^{87}Rb в $\sigma+$ - $\sigma+$ схеме регистрации. Достигнуто двукратное улучшение кратковременной стабильности частоты центрального резонанса при использовании Ne вместо N₂. Обнаружены и объяснены особенности формы сигнала Рэмси-КПН, связанные с оптической накачкой в паразитное непоглощающее состояние.

D. S. CHUCHELOV, E.A. TSYGANKOV, M.I. VASKOVSKAYA, K. M. SABAKAR, S.A. ZIBROV, V.V.
 VASSILIEV, V.L. VELICHANSKY
Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

RAMSEY-CPT FRINGES IN QUENCHING AND DEPOLARIZING GASES

We investigated the influence of different buffer gases on the characteristics of the Ramsey-CPT resonance in miniature gas cells with ^{87}Rb in the $\sigma+$ - $\sigma+$ scheme. A twofold increase in the short-term stability of the central resonance frequency was attained as N₂ in the cell was substituted by Ne. Features of the Ramsey-CPT signal shape associated with optical pumping to a non-absorbing trap state are discovered and explained.

В рубидиевых стандартах частоты на двойном радиооптическом резонансе в качестве одного из буферных газов в рабочей газовой ячейке традиционно используют молекулярный азот из-за его свойства тушения спонтанного излучения атомов Rb. Однако в работе [1] нами было показано, что это свойство N₂ приводит к уменьшению контраста резонанса когерентного пленения населенностей (КПН) в $\sigma+$ - $\sigma+$ схеме, применяемой в миниатюрных атомных стандартах частоты, вследствие оптической накачки атомов ^{87}Rb в паразитное непоглощающее состояние. В схеме с непрерывным взаимодействием излучения с рабочими атомами при использовании благородных буферных газов удалось добиться двукратного улучшения отношения контраста резонанса КПН к его ширине, определяющей кратковременную нестабильность частоты стандарта.

Привлекательным подходом к разработке миниатюрных КПН-часов с улучшенной стабильностью частоты является Рэмси-спектроскопия, поскольку импульсная схема детектирования обеспечивает существенное подавление светового сдвига частоты метрологического перехода. В докладе представлены результаты исследования влияния различных буферных газов на характеристики сигнала Рэмси-КПН (рис. 1а) в миниатюрных газовых ячейках. В качестве источника накачки использовался лазер с вертикальным резонатором, ток инъекции которого модулировался СВЧ-сигналом на частоте близкой к половине сверхтонкого расщепления основного состояния ^{87}Rb ($\approx 3,4$ ГГц). Измерения девиации Аллана продемонстрировали улучшение кратковременной стабильности частоты центрального резонанса для ячейки с Ne в 2 раза по сравнению с N₂ (рис 1б) [2]. Были обнаружены и объяснены особенности формы сигнала Рэмси-КПН, связанные с оптической накачкой в паразитное непоглощающее состояние в $\sigma+$ - $\sigma+$ схеме.

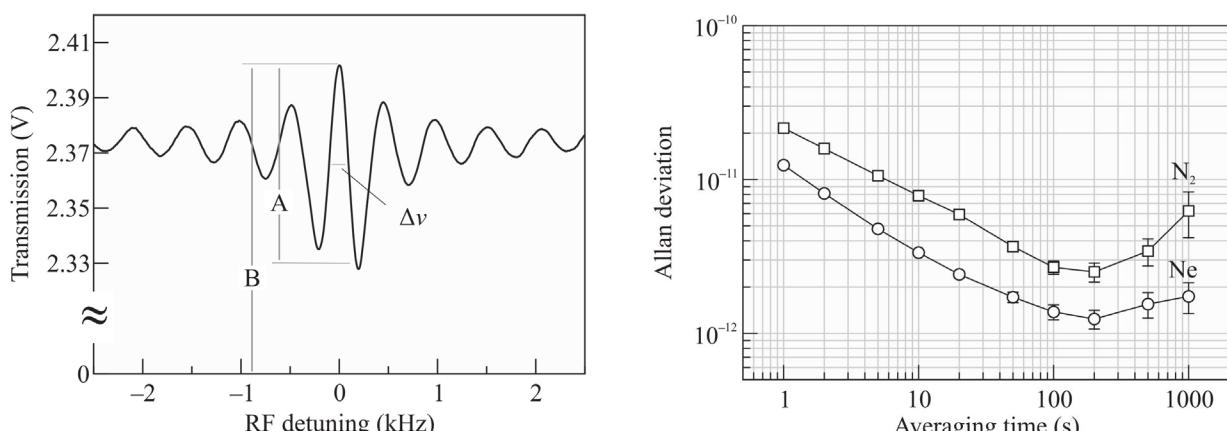


Рис. 1. Резонанс Рэмси-КПН, зарегистрированный в миниатюрной газовой ячейке с ^{87}Rb и 90 Торр Ne (а). Девиация Аллана частоты центрального резонанса Рэмси-КПН в ячейках с N₂ и Ne (б).

Список литературы

1. Sabakar K. M. et al. Effect of Depolarizing and Quenching Collisions on the Contrast of Coherent Population Trapping Resonance //Physical Review Applied. – 2023. – Т. 20. – №. 3. – С. 034015.
2. Chuchelov D. S. et al. Contrast of Ramsey-CPT Fringes in Quenching and Depolarizing Gases //JETP Letters. – 2024. – Т. 119. – №. 1. – С. 16-19

В.А. ШИЛОВ, Д.В. БОРТКО, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ НАНОКЛАСТЕРОВ ОКСИДА ТАНТАЛА (V) И CORE-SHELL НАНОКЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА/ОКСИДОВ ТАНТАЛА ОТ РАЗМЕРА

В данной работе были получены образцы нанокластеров оксида тантала (V) и core-shell нанокластеров Ta/TaO₂. По результатам анализа спектров характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ, REELS) восстановлена зависимость ширины запрещённой зоны от размера нанокластеров.

V.A. SHILOV, D.V. BORTKO, P.V. BORISYUK, O.S. VASILYEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SIZE DEPENDENCE OF THE BAND GAP WIDTH OF TANTALUM (V) OXIDE NANoclUSTERS AND CORE-SHELL TANTALUM/TANTALUM OXIDE NANoclUSTERS

Samples of Ta₂O₅ and core-shell Ta/TaO_x nanoclusters were obtained. Based on the results of the analysis of samples using reflected electron energy loss spectroscopy (REELS), the dependence of the band gap on the size of nanoclusters was reconstructed.

Методом магнетронного распыления получены монодисперсные пленки сферических нанокластеров оксида тантала (V) и сферических нанокластеров тантала с оболочкой из оксида тантала диаметром 1,4–8 нм. Монодисперсные нанокластерные плёнки (с отклонением по размерам нанокластеров не более 2%) были получены при помощи кластерного источника Nanogen-50 (Mantis Deposition Ltd.), установленного в сверхвысоковакуумном комплексе анализа поверхности Omicron, методом магнетронного распыления. Размер осаждаемых нанокластеров контролировался с помощью квадрупольного масс-фильтра. Химический состав аттестовался методом XPS. С помощью спектроскопии потерь энергии отраженных электронов (REELS) определена зависимость ширины запрещенной зоны от размера нанокластера (рис. 1). Установлено, что, начиная с определенного размера нанокластера, ширина запрещенной зоны увеличивается по мере уменьшения размера нанокластера. На основе экспериментальных данных и теоретической модели получена зависимость эффективной массы электронов от размера нанокластера (рис. 2). Обнаруженная зависимость ширины запрещенной зоны от диаметра нанокластера свидетельствует о проявлении квантово-размерных эффектов при уменьшении размера кластера. В случае нанокластеров оксида тантала при уменьшении радиуса нанокластера от 6 нм до 1,5 нм наблюдается резкое изменение ширины запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны изменяется от значений, характерных для объемного оксида тантала, до значений, в ~1,9 раза больших. Для нанокластеров типа core-shell характерен аналогичный ход этой зависимости, однако ширина запрещенной зоны увеличивается в 1,5 раза. Кроме того, характер зависимости становится немонотонным, что может быть обусловлено дискретностью электронных уровней в металлическом ядре нанокластера при его размере $d < 2$ нм и переходом металл–неметалл. Возможность изменения ширины запрещенной зоны нанокластерной пленки в широких пределах может позволить регулировать электронные и оптические свойства материала, что важно для разработки селективных оптических покрытий, нелинейных оптических материалов и фотодетекторов.

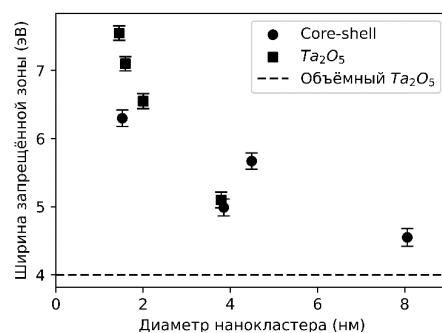


Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны от размера нанокластера

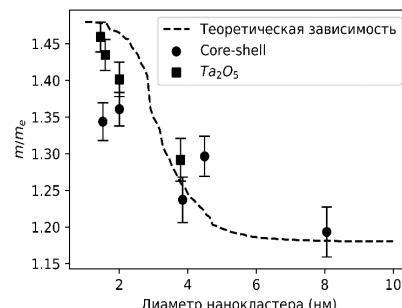


Рис. 2. Зависимость эффективной массы электронов в нанокластере от размера нанокластера

Н.Ю. ШЛЫКОВ, М.О. ЯУШЕВ, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А. МИШИН, Д.О. ТРЕГУБОВ,
Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ, А.А. ГОЛОВИЗИН
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
Российский квантовый центр, Москва, Россия

СПЕКТРОСКОПИЯ РИДБЕРГОВСКИХ СОСТОЯНИЙ АТОМА ТУЛИЯ

В рамках работы проведена спектроскопия ридберговских состояний атомов тулия с использованием перестраиваемой лазерной системы на 392 нм и магнитооптической ловушки. Были исследованы состояния с главным квантовым числом n в диапазоне от 39 до 77. Также были уточнены энергии ионизации с учётом сверхтонкого расщепления основного состояния иона тулия (Tm II). Проведённые исследования позволяют в дальнейшем выполнять когерентное возбуждение ридберговских уровней, необходимое для реализации двухкубитных гейтов в квантовых вычислителях и симуляторах.

N.Y. SHLYKOV, M.O. YAUSHEV, D.I. PROVORCHENKO, D.A. MISHIN, D.O. TREGUBOV, N.N.
KOLACHEVSKY, A.A. GOLOVIZIN,
P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia
Russian Quantum Center, Moscow, Russia

SPECTROSCOPY OF THULIUM RYDBERG STATES

In this work, spectroscopy of Rydberg states of thulium atoms was performed using a tunable laser system at 392 nm and a magneto-optical trap. States with principal quantum numbers n ranging from 39 to 77 were studied. Additionally, the ionization energies were refined, taking into account the hyperfine splitting of the ground state of the thulium ion (Tm II). These studies pave the way for coherent excitation of Rydberg levels, which is essential for implementing two-qubit gates in quantum computers and simulators.

Ридберговские состояния атомов представляют собой уникальный инструмент для современных технологий и фундаментальных исследований. Сильное взаимодействие на дальних расстояниях и долгое время жизни делают их перспективными для квантовых вычислений и симуляций. В недавнем исследовании были продемонстрированы квантовые вентильные операции с высокой точностью на ридберговских состояниях атомов рубидия и цезия [1].

В рамках настоящего исследования была собрана перестраиваемая лазерная система с удвоением частоты на длине волны 392 нм. В качестве источника излучения использовался лазерный диод с длиной волны 784 нм, после которого был установлен усилитель TOPTICA BoosTA, после которого частота удваивалась в резонаторе типа бабочка с нелинейным кристаллом ВВО (бета-бората бария). Выходная мощность излучения составляла 2.5 мВт. Частота излучения измерялась с использованием измерителя длин волн WS8 с точностью не хуже 5 МГц.

Возбуждение ридберговских состояний атомов тулия, захваченных в магнито-оптической ловушке [2], осуществлялось двухфотонным процессом через промежуточный уровень $4f^{13}(^2F_{7/2})6s6p(^1P_1)$. Возбуждение промежуточного уровня выполнялось непосредственно охлаждающим лазерным излучением, так как верхний уровень первичного охлаждения $4f^{12}5d6s^2$ имеет примесь используемого промежуточного уровня. С промежуточного уровня с конфигурацией 1P_1 было получено возбуждение ns и nd серий конфигурации $4f^{13}(^2F_{7/2})6s$. Сканирование и детектирование резонанса проводилось по следующему циклу: загрузка атомов в ловушку, измерение количества атомов, 300 мс облучение на исследуемой частоте и повторное измерение количества атомов. При совпадении частоты лазера с частотой перехода наблюдалось резонансное уменьшение числа атомов во втором измерении. Скорость сканирования составляла 1-2 МГц/с.

Благодаря гибкости перестройки лазерной системы удалось провести спектроскопию ридберговских состояний близких по энергии к энергии ионизации. В ходе эксперимента были измерены состояния с главным квантовым числом n в интервале от 39 до 77. Это позволило получить подробную картину переходов и провести анализ некоторых серий. Из экспериментальных данных была получена численная оценка энергий ионизации для сверхтонкого расщепления основного состояния иона Тулия (Tm II): $I(F = 7/2) = (49880.39 \pm 0.01) cm^{-1}$, $I(F = 9/2) = (49880.56 \pm 0.01) cm^{-1}$. В дальнейшем планируется провести классификацию возбуждённых серий с использованием мультиканальной квантовой теории дефектов (MQDT).

Список литературы

1. M Saffman 2016 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **49** 202001.
2. D. Sukachev et al., "Magneto-optical trap for thulium atoms", *Physical Review A*, 82, 011405, 2010.

Секция
**ОБРАЗОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ: ВЫЗОВЫ, МЕТОДИКИ,
ПЕРСПЕКТИВЫ**

Председатель — к.ф.-м.н., зам. директора института ЛаПлаэ
секции Рябов Павел Николаевич

Сопредседатель — и.о. директора УНЦ «Квантовый
инжиниринг» Ляхова Яна Сергеевна

Секретарь — ассистент кафедры «Прикладная
математика» Кан Кристина

Тел.: +7 985 832 24 22
E-mail: kristina.v.kan@gmail.com

О.Н. ГУСТУН, В.Д. КОСТЫЛЕВ, Ю.К. ЛАВДИНА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ СТУДЕНТОВ ОСНОВНОГО И УГЛУБЛЕННОГО УРОВНЕЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИНФОРМАТИКА»

Проведен сравнительный анализ профилей студентов первого курса Института лазерных и плазменных технологий (ЛаПлаз) НИЯУ МИФИ, проходивших обучение по уровневой дисциплине «Информатика» на основном и углубленном уровнях подготовки в 1-м семестре 2024/2025 учебного года. Для построения профиля используются как показатели успешности обучения студента, так и результаты анализа его действий в адаптивной информационно-образовательной среде.

O.N. GUSTUN, V.D. KOSTYLEV, Y.K. LAVDINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF STUDENT PROFILES OF THE BASIC AND ADVANCED “INFORMATICS” COURSE LEVELS

The comparative analysis of the profiles of first-year students at the Institute of Laser and Plasma Technologies (LAPLAS) of NRNU MEPhI, who studied the multilevel course "Informatics" at the basic and advanced levels during the first semester of the 2024-2025 academic year, is presented. The profiles are formed using the students' academic performance indicators and the results of analyzing their actions in the adaptive information and educational environment.

В начале семестра студенты прошли распределение по дисциплине «Информатика» на один из уровней: основной или углубленный. Содержание учебных программ этих уровней различается: на углубленном уровне студенты осваивают больший объем учебного материала, получают более сложные и трудоемкие задания с более жесткими требованиями к их выполнению. При этом объем часов учебных занятий одинаков на обоих уровнях.

По результатам обучения студентов построены профили студентов и студенческих групп по следующим категориям показателей: успешность обучения, качество выполнения учебных заданий, самостоятельность выполняемой учебной работы. Каждой из этих категорий соответствует набор параметров, значения которых можно оценить численно на основе данных, полученных в процессе обучения. Например, для студенческих групп такими параметрами являются средние значения следующих показателей, которые можно определить, как для основного уровня, так и для углубленного:

- успешность обучения (У):

- итоговый балл (У-1) и его среднеквадратичное отклонение (У-2), в баллах из 100;
- результативность тестирования по темам (У-3) и по разделам (У-4), в процентах;

- качество выполнения учебных заданий (К):

- завершенность решения заданий для лабораторных (К-1) и самостоятельных (К-2) работ, в процентах;
- количество попыток изменения решения (К-3) с целью его исправления и/или усовершенствования;
- время подготовки к тестированию (К-4), в минутах;

- самостоятельность выполняемой учебной работы (С):

- процент выявленных попыток заимствования («плагиата») решений (С-1);
- доля заданий, по которым выявлены попытки заимствования решений (С-2).

Пример значений показателей профилей одной из студенческих групп, численный состав которой поровну разделен на два уровня обучения, приведен в табл. 1.

Табл. 1. Значения показателей профилей одной из студенческих групп ЛаПлаз в 1-м семестре 2024/2025 уч. года.

Уровень обучения	Количество студентов	У-1	У-2	У-3	У-4	К-1	К-2	К-3	К-4	С-1	С-2
основной	12	71,9	10,7	51,3	66,6	99,3	88,7	3,72	8,4	15,4	25,4
углубленный	12	75,2	12,2	61,7	73,5	98,7	96,2	4,46	17,0	2,3	6,8

Сравнительный анализ профилей основного и углубленного уровней позволяет сделать следующие выводы:

- успешность обучения студентов углубленного уровня выше по сравнению со студентами основного уровня, студенты углубленного уровня достигают больших результатов, несмотря на повышенную учебную нагрузку;
- задания для лабораторных работ на углубленном уровне более трудоемкие, чем на основном;
- студенты углубленного уровня уделяют больше внимания всем видам самостоятельной подготовки, и существенно меньше используют заимствования («плагиат») при выполнении заданий.

Е.В. АЛЕШИНСКАЯ, Л.В. РАССКАЗОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВОЗМОЖНОСТИ ЖАНРОВОЙ ПЕДАГОГИКИ В ОБУЧЕНИИ АСПИРАНТОВ ИНЖЕНЕРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АКАДЕМИЧЕСКОМУ ПИСЬМУ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Рассматривается возможность формирования навыков написания научного текста на английском языке с использованием жанровой педагогики, основанной на предоставлении обучающимся, тщательном анализе и воспроизведении модели текста в рамках определенного жанра. Показан высокий потенциал жанровой педагогики в обучении академическому письму по таким компонентам, как решение коммуникативной задачи, организация научного текста, языковое оформление и соответствие научному стилю.

E.V. ALESHINSKAYA, L.V. RASSKAZOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

POSSIBILITIES OF GENRE PEDAGOGY IN TEACHING ACADEMIC WRITING IN ENGLISH TO PHD STUDENTS OF AN ENGINEERING RESEARCH UNIVERSITY

The article considers the possibility of developing the skills of writing a scientific text in English using genre pedagogy, based on providing students with a text model within a certain genre followed by its thorough analysis and reproduction. A high potential of genre pedagogy in teaching academic writing is shown for such components as solving a communicative task, organizing the scientific text, language design and compliance with the scientific style.

Обучение основам написания научных текстов предполагает знакомство со специфическими особенностями жанра научного текста и признание ролей языка в выполнении конкретных речевых социальных действий [1]. В рамках курса по академическому письму в инженерно-исследовательском университете главной целью становится повышение осведомленности аспирантов технических специальностей о различных условностях (дискурсивных практиках, дискурсивных процедурах и дисциплинарных культурах) в рамках определенного жанра [2]. Жанровое обучение академическому письму заключается в предоставлении аспирантам модели текста в рамках рассматриваемого жанра с обязательным ее тщательным анализом и последующим воспроизведением [3]. Обучение в рамках жанровой педагогики строится с учетом 5 стадий: определение контекста жанра, анализ репрезентативных образцов жанра, совместное построение, самостоятельное построение и сравнение с другими жанрами и контекстами [4].

В данном исследовании рассматриваются возможности применения жанровой педагогики для формирования навыков написания экспозиторных эссе как одного из важных жанров научного текста. Для этого был проведен эксперимент, в котором приняли участие 20 аспирантов НИЯУ МИФИ. Эксперимент включал три задания, в ходе которых аспиранты писали экспозиторное эссе в соответствии с поставленными условиями. Первое эссе было предложено аспирантам в качестве предварительного задания для определения исходного уровня владения материалом. В конце занятия по разбору модели экспозиторного эссе аспирантам было предложено написать еще одно эссе по предложенному заданию, опираясь на полученные в ходе занятия знания. Третье эссе участники эксперимента должны были написать через некоторое время, уже в конце академического года. Для анализа количественных данных эксперимента была использована серия парных *t*-тестов для изучения различий между результатами трех заданий (эссе 1, эссе 2, эссе 3).

В результате исследования показано, что по каждому критерию значение *p* последующих эссе меньше 0,05, что свидетельствует о статистически значимой разнице между средними баллами в три разных момента времени по четырем компонентам задания: решению коммуникативной задачи, организации научного текста, языковому оформлению и соответствуию стилю речи. Участники эксперимента добились значительного прогресса в написании экспозиторных эссе: стали лучше организовывать текст эссе, контролировать степень формальности и делать правильный языковой выбор. Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод, что обучение академическому письму на основе жанра экспозиторного эссе с использованием технологий жанровой педагогики прошло успешно в течение относительно короткого периода времени.

Список литературы

1. Yasuda S. Genre-based tasks in foreign language writing: Developing writers' genre awareness, linguistic knowledge and writing competence // Journal of Second Language Writing. 2011. Vol. 20. P. 111–133.
2. Bhatia V. K. Interdiscursivity in professional communication // Discourse & Communication. 2010. Vol. 21, № 1. P. 32–50.
3. Васильева Н. Л., Алешинская Е. В. Жанровая педагогика в обучении академическому письму // Филологический класс. 2024. Т. 29, № 1. С. 143–151.
4. Hyland K. Genre pedagogy: Language, literacy and L2 writing instruction // Journal of Second Language Writing. 2007. Vol. 16. P. 148–164.

И.В. БАРАНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И РАЗВИТИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН

Рассмотрены вопросы подготовки, опробования и отладки новых учебных задач, новых шаблонов учебных задач и переноса уже используемых задач в учебном плане как стабильных, так и новых математических учебных дисциплин. Приведены примеры потребностей в связанных учебных дисциплинах, подтверждающие востребованность в создании новых учебных задач. Предложен подход, названный учебно-методической разведкой (УМР), для решения методических и аттестационных задач, а также показаны и размечены возможные риски и успехи при применении данного подхода.

I.V. BARANOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE USE OF EDUCATIONAL AND METHODICAL OBSERVATION IN THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL ACADEMIC DISCIPLINES

The issues of preparation, testing and debugging of new academic assignments, new templates of academic assignments and the transfer of already used assignments to the curricula of both stable and updated mathematical academic disciplines are considered. Examples of needs in related academic disciplines are provided, confirming the relevance when creating new academic assignments. To solve methodological and certification problems, an approach called educational and methodical observation (EMO) is proposed, and the possible risks and benefits of using this approach are shown and classified.

Сложившаяся учебно-методическая традиция ценит стабильность математических знаний школьников и студентов и считает её незыблемым основанием системы образования. Тем не менее, уплотнение и разбалансировка учебных планов образовательных программ университетов продолжаются длительно и не вызывают адекватных изменений учебных планов входящих в образовательные программы дисциплин. Это в целом закономерно приводит к утрате структурности учебного процесса и стабильному снижению аттестационных требований к студентам.

В докладе представлен подход к ускорению и упорядочиванию изменений материалов учебных дисциплин, названный учебно-методической разведкой. Ускорение изменений достигается вследствие создания разнородных условий аттестации студентов в группе или потоке. Упорядочивание изменений достигается посредством взаимодействий со студентами и преподавателями, затрагивающих преподаваемые и смежные дисциплины, и контрольными наблюдениями в разных контекстах и форматах.

Среди обширного разнообразия проблем выделен комплекс следующих: разнородность скорости усвоения учебных материалов студентами, хронический недостаток средств практического закрепления теоретического изложения материала, уязвимость стабильных учебных материалов к подмене студенческих решений готовыми, в том числе заказными, нестыковки математических разделов учебного плана и их естественнонаучных приложений. Предлагается способ решения указанных проблем с помощью блочного подхода, сходного с действиями технологических разведок и испытательных отделов производственных комплексов. Блочная структура решения позволяет в перспективе гибко и достаточно глубоко разделять компетенции участников процесса по ролям, а также правильно настраивать переключения между ролями для одного и того же участника и оптимальными для таких ролей состояниями.

Название нового подхода «Учебно-методическая разведка» должно полноценно отразить масштабность подхода. Выяснение степени полезности, проработанности и востребованности частиц и разделов учебных материалов ведётся у различных участников учебного процесса раздельно в блоках предметного анализа и предметных собеседований. В блоке разведки решаемости задач студентам предлагаются задачи, теория к которым обычно излагается в лекциях, и преподаватель проверяет решения на правильность, осмыслинность и даже честность выполнения. Также иногда студентам предлагаются задачи, к которым метод решения полностью не изложен, но может быть получен после осмыслинения большого теоретического раздела учебного курса. Помимо этого, изложены типовые планы учёта успехов учащихся в разведке студентов на промежуточной аттестации и факторы, усиливающие и ослабляющие эффективность разведки в целом.

Вместе с возможностями, предоставляемыми учебно-методической разведкой, были выявлены и риски применения разных блоков учебно-методической разведки. Не выявлено ни одной критической опасности для преподавателей, следующих принципам учебно-методической разведки, но при этом менее опасные риски весьма разнообразны и зачастую проявляются медленно и незаметно. Специально выделена часть рисков, которые можно выявить перед применением учебно-методической разведки.

Н.А.БОГДАНОВА, Ю.И.БОГДАНОВ

Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, Россия
НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» - ФТИАН им. К.А. Валиева, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВУЮ ИНФОРМАТИКУ ЧЕРЕЗ БАЗОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

В докладе рассмотрена методика введения квантовой информатики в качестве составной части университетской программы технического профиля в рамках разделов дисциплин «Дискретная математика» и «Матричная алгебра». Вслед за рассмотрением классической двоичной логики и ее законов вводится квантовая логика как реализация матричной алгебры с применением унитарных преобразований. Как составная часть курса вводится расширенная матричная алгебра, а именно скалярное произведение матриц, тензорное произведение, матричная экспонента и др. В разделе «Теория групп» для целей квантовой информатики подробно рассматриваются группы кватернионов и группа на основе матриц Паули, посредством которых вводится квантовый логический элемент -кубит.

N.A. BOGDANOVA, YU.I. BOGDANOV

National Research University MIEt Moscow, Russia

NRC "KURCHATOV INSTITUTE" - Valiev Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

INTRODUCTION TO QUANTUM INFORMATICS THROUGH BASIC MATHEMATICAL DISCIPLINES

The report presents the methodology of introducing quantum information science as a component of the university program of technical profile within the framework of the sections of the disciplines "Discrete Mathematics" and "Matrix Algebra". Following the consideration of classical binary logic and its laws, quantum logic is introduced as a realization of matrix algebra using unitary transformations. Extended matrix algebra is introduced as a component of the course, namely the scalar product of matrices, tensor product, matrix exponent, etc. In the section "Group Theory" for the purposes of quantum information science, quaternion group and Pauli group are considered in detail, by means of which a quantum logical element qubit is introduced.

Внедрение квантовой информатики в базовый естественно-научных пул дисциплин высшего технического образования является сегодняшним технологическим запросом, связанным с ростом интереса к квантовым информационным технологиям и их внедрением в практику [1]. Для подготовки целевых специалистов, инженеров и ученых в области квантовых технологий соответствующие образовательные программы уже реализуются в ряде ведущих университетов. По большей части, это магистерские программы. Однако, научно-технологическая практика требует наличия базовых знаний в области квантовой информатики у студентов практически всех технических специальностей, связанных с информационными технологиями, электроникой и наноэлектроникой. Подобно тому, как в свое время с развитием классической вычислительной техники в обязательную университетскую программы были включены двоичная Булева алгебра логики и матричная алгебра, основы квантовой логики и целиком квантовая парадигма сегодня должны стать стандартом образовательной программы для технических университетов.

По нашему мнению, необходимый минимум общего квантового образования должен включать следующие:

1. История появления квантовой механики и квантовой информатики, начиная с работы Планка 1900 года.
2. Расширенная матричная алгебра, включающая алгебру матриц Паули, а также понятия тензорного произведения и матричной экспоненты. Представление квантового логического элемента с помощью матричной алгебры и сферы Блоха.
3. Базисные однокубитные операторы на основе матриц Паули, оператор Адамара, а также оператор вращения сферы Блоха. Двух и многокубитные квантовые состояния и операции.
4. Изучение явления квантовой запутанности. Разложение Шмидта, svd- разложение. Критерий запутанности двухкубитного чистого квантового состояния.
5. Расчет квантовых схем. Некоторые квантовые алгоритмы, в том числе алгоритмы сверхплотного кодирования и телепортации, квантовое преобразование Фурье и оценка его алгоритмической сложности, алгоритмы Шора и Гровера.

В качестве образовательного инструмента в МИЭТ создан онлайн-курс на портале edu.miet.ru. Курс «Дискретная математика и квантовая информатика» включает в себя видео-лекции по классической булевой алгебре логике, теории групп, по специальным разделам матричной алгебры и основам квантовой информатики, включая популярные разделы с квантовыми парадоксами и квантовыми играми, а также основные практические задачи квантовой информатики и самые известные квантовые алгоритмы. В курсе представлена демонстрация работы облачного 5-ти кубитного квантового компьютера IBM. Видео-лекции записаны в студии МИЭТ с использованием интерактивной доски. Каждый раздел заканчивается тестом с электронной проверкой, выставлением оценки, комментариев ошибок и правильных ответов.

Список литературы

1. Богданов Ю.И., Богданова Н.А. Лукичев В.Ф. Введение в квантовые информационные технологии // М. Техносфера. 2025, 468 стр.

А.Д. ЕГОРОВ, А.М. ХАСАНОВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ КУРСА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

В работе рассмотрены ключевые элементы курса по машинному обучению для студентов, ориентированных на практическое применение технологий при решении задач, характерных для инженерных направлений подготовки, указана структура пререквизитов, а также логика организации курса.

A.D. EGOROV, A.M. KHASANOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

STRUCTURE FEATURES OF A MACHINE LEARNING COURSE FOR STUDENTS - FUTURE ENGINEERS

The paper examines the key elements of a course in machine learning for students focused on the practical application of technologies in solving problems characteristic of engineering areas of training, indicates the structure of prerequisites, as well as the logic of organizing the course.

Нобелевская премия по химии и по физике в 2024 году присуждена за использование технологий машинного обучения в химии [1] и за фундаментальные разработки в области машинного обучения, которые повлияли на развитие всех физических наук [2,3]. Таким образом подчёркнута важность указанных технологий в современной физике и химии. Подобная ситуация подчёркивает необходимость внедрения курсов по машинному обучению в учебные планы студентов, изучающих инженерные направления подготовки.

Для осмысленного освоения курсов по машинному обучению (далее – МО) студентам необходимо освоить базовый курс алгоритмов и структур данных (так как МО подразумевает необходимость использования таких структур), курс математической статистики (анализ распределений данных – необходимый элемент подготовки моделей), а значит курсы интегральных и дифференциальных исчислений, а также теории вероятности. Кроме того, студенты должны обладать навыком программирования на языке Python (так как на сегодня значительная часть прикладных пакетов для работы с МО написаны именно на этом языке). Таким образом, изучение машинного обучения возможно не ранее 3 семестра.

Структура курса должна включать два блока: классические модули машинного обучение и глубокое машинное обучение с использованием нейронных сетей. Изучение правил и принципов машинного обучения проходит на примере более простых «классических» моделей (регрессии, ансамблевые модели на лесах). Изучение современных технологий на примере нейросетевых моделей, вплоть до современных моделей трансформеров. При этом ключевая задача – научить студентов разумно пользоваться моделями. Зачастую не требуется глубоко погружаться в структуру и организацию современных алгоритмов.

Для закрепления практического навыка необходимо рекомендовать студентам участвовать в профильных проектных и технических соревнованиях.

Такой подход позволит сформировать у студентов устойчивые компетенции владения моделями машинного обучения, не перегружая их глубоким знанием принципов и правил их функционирования, которые необходимы только разработчикам этих моделей.

Методические материалы курса авторов тезиса: <https://github.com/ShadarRim/24MEPhIAI>

Список литературы

1. Abramson J. et al. Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3 //Nature. – 2024. – C. 1-3.
2. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks //Advances in neural information processing systems. – 2012. – T. 25.
3. Hopfield J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities //Proceedings of the national academy of sciences. – 1982. – T. 79. – №. 8. – C. 2554-2558.

Н.С. ИЛЬИН, А.С. КОВАЛЬ
Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИИ ЗАДАНИЙ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКЕ СРЕДСТВАМИ Т-FLEX CAD

Рассмотрены способы автоматической генерации заданий по инженерной графике в САПР Т-FLEX CAD. Применение параметрического моделирования вместе с созданием ассоциативных чертежей благодаря широкому функционалу встроенного редактора переменных позволяет значительно снизить трудоемкость обновления электронного репозитория графических заданий по дисциплине «Инженерная графика».

N.S. ILYIN, A.S. KOVAL

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

AUTOMATION OF THE GENERATION OF ENGINEERING GRAPHICS TASKS USING T-FLEX CAD

The methods of automatic generation of engineering graphics tasks in T-FLEX CAD are considered. The use of parametric modeling together with the creation of associative drawings, thanks to the extensive functionality of the built-in variable editor, significantly reduces the complexity of updating the electronic repository of graphic tasks in the discipline of Engineering Graphics.

Инженерная графика является важной частью инженерного образования, обеспечивая студентов навыками создания точных и понятных чертежей, необходимых для проектирования и производства. Она включает в себя методы и принципы визуализации технических идей на плоскости, что является ключевым элементом в передаче информации между инженерами и конструкторами.

Для эффективного обучения и закрепления навыков в инженерной графике требуется большое количество разнообразных заданий. Ввиду того, что задания по дисциплине имеют графическое представление, их создание является весьма трудоемким процессом. При этом требуется обеспечить индивидуальный комплект заданий для каждого студента, минимизировав совпадения между потоками.

Расширение репозитория графических заданий возможно за счет вариации геометрических форм путем комбинирования типовых элементов деталей [1] или обеспечением вариативности размеров [2]. Автоматизация процесса может быть выполнена также различными способами: с использованием специального программного кода или путем генерации набора параметров, например в Excel, с их последующей выгрузкой в САПР, который выполняет обновление моделей и чертежей [2].

Применение отечественного САПР Т-FLEX CAD позволяет обойтись без использования сторонних приложений для автоматизации процесса формирования вариантов отличающихся значением размеров. Одним из способов является задание параметров, определяющих форму детали с использованием генератора случайных значений. Например, выражение для переменной, определяющей размер, который может варьироваться от 10 до 20 мм с шагом в 2 мм в редакторе переменных будет выглядеть как `round(random(0,5),1)*2+10`, где функция `random` возвращает случайное значение в диапазоне [0,5], а функция `round` округляет значение до целого.

Другим способом является использование встроенной базы данных, при этом создаются таблицы, содержащие набор значений для каждого размера или же все параметры сводятся в общую таблицу. Значение переменной выбирается случайным образом из указанной таблицы: `val(round(random(1,Размеры.#),1),Размеры.Н1)`, где функция `val` получает значение из столбца «Н1» таблицы «Размеры», при этом номер строки определяется функцией `random`, возвращающей случайное значение по количеству строк в таблице, которое затем округляется. После пересчета модели автоматически обновляется и ассоциативный чертеж, который экспортируется в формат PDF.

Использование автоматической генерации позволило существенно расширить репозиторий графических заданий, при этом кардинально сократив трудозатраты на создание вариантов, отличающихся размерами. Следует заметить, что сгенерированный чертеж задания при этом все же требует внимания с целью контроля корректности оформления, а подбор диапазона варьирования каждого размера должен обеспечивать корректность формы детали.

Список литературы

1. Генератор заданий по инженерной графике / Е. П. Касаткина, Е. А. Хесина, Е. Я. Чахеев, В. А. Суховерхий // Информатизация инженерного образования : Труды Междунар. науч.-практ. Конф. - ИНФОРИНО-2016, Москва, 12–13 апреля 2016 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 142-145.
2. Еремина, В. А. Использование параметрических шаблонов для разработки вариантов графических заданий // Инновационные технологии в инженерной графике: проблемы и перспективы : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., 20 апреля 2018 г., Брест, Республика Беларусь, Новосибирск, Российская федерация / отв. Ред. О.А. Акулова. - Брест : БрГТУ, 2018., – С. 114-119.

М.А. КАЛИНИЧЕВ, Я.С. ЛЯХОВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБЗОР ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПО КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ ДЛЯ АБИТУРИЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ

Область современных квантовых технологий является перспективной наукой отраслью, для которой уже существуют направления подготовки в университетах. Однако количество выпускников не соответствует прогнозируемым потребностям, поэтому для повышения квалификации и усиления мотивации будущих абитуриентов таких направлений, как квантовые технологии, необходима соответствующая работа с абитуриентами. В этом докладе мы представляем анализ различных методик преподавания квантовой физики для учащихся школы, рассмотрены возможности и необходимость создания на основе университета эффективных школьных курсов дополнительного образования.

M.A. KALINICHEV, YA.S. LYAKHOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

REVIEW OF EDUCATIONAL TRAJECTORIES IN QUANTUM PHYSICS FOR APPLICANTS OF TECHNICAL UNIVERSITIES

The field of modern quantum technologies is a promising science-intensive industry, for which there are already university educational programs. However, the number of graduates does not meet the projected needs, appropriate work with applicants is necessary to improve their skills and strengthen the motivation of future applicants in areas such as quantum technologies. In this report, we present an analysis of various methods of teaching quantum physics to school students, and consider the possibilities and necessity of creating effective university-based school courses for additional education.

В настоящие дни сфера квантовых технологий активно развивается, по оценкам [1], к 2030 году общий мировой рынок квантовых вычислений составит 1 млрд. долл. Квантовая криптография уже применяется для практических целей, а прикладное использование квантовых вычислений может быть достигнуто в ближайшее время. Таким образом, возникает необходимость подготовки кадров в данных областях. Для увеличения числа квалифицированных выпускников университета следует мотивировать заниматься квантовой физикой, начиная со школьного возраста. Существует заинтересованность повышением уровня компетенций в области квантовой механики среди учителей физики для проведения дополнительной подготовки и внеклассной деятельности интересующихся учеников. Возникает необходимость разработки методических материалов по квантовой механике для школьных преподавателей. При этом необязательность преподавания принципов квантовой физики в учебном плане и общая загруженность системы образования не позволяют создавать подобные курсы в рамках школьной системы. В качестве решения может быть предложено производство учебных материалов силами университетских методистов. Развитие квантовых треков для абитуриентов позволит увеличить эффективность обучения на начальных и последующих этапах высшего образования.

В качестве первого шага этой работы был произведен обзор [2,3] материалов, методик, тем, виртуальных сред, которые позволяют преподавать квантовую механику на школьном уровне в России и за рубежом. В частности, проанализированы статистические данные [4] о преподавании различных тем по квантовой механике, которые доступны для объяснения ученикам выпускных классов школы. Оценена эффективность и возможность использования существующих материалов для качественного обучения школьников. Анализ результатов приводит к выводу о наличии большого числа возможностей для модификации и создания новых практик подготовки учеников. При этом выявлены и слабые стороны имеющихся квантовых траекторий, связанные с уровнем мотивации учеников, доступностью качественных материалов и т. д. Результаты проведённого анализа могут стать важной отправной точкой при создании квантового трека для абитуриентов технических вузов.

Список литературы

1. E. Hazan et al., “The next tech revolution: quantum computing,” (2020). <https://www.mckinsey.com/fr/our-insights/the-next-tech-revolution-quantum-computing>.
2. M. L. Chiofalo, C. Foti et al. Educ. Sci. 12, 446 (2022)
3. K. Krijtenburg-Lewerissa, H. J. Pol et al. Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 13, 010109 (2017)
4. H. K. E. Stadermann, E. van den Berg and M. J. Goedhart. Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 15, 010130 (2019)

С.В. КИРЕЕВ, В.М. КАЛАШНИК

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ДПО НИЯУ МИФИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КВАЛИФИЦИРОВАННЫМИ И ВОСТРЕБОВАННЫМИ КАДРАМИ ПРИОРИТЕТНЫХ ОТРАСЛЕЙ РОССИИ

В работе анализируется система дополнительного профессионального образования (ДПО) НИЯУ МИФИ и её роль в обеспечении технологического суверенитета России благодаря опережающей подготовке высококвалифицированных кадров по приоритетным направлениям

S.V. KIREEV, V.M. KALASHNIK

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF THE MEPhI FURTHER PROFESSIONAL EDUCATION SYSTEM TO PROVIDE QUALIFIED AND IN-DEMAND STAFF FOR RUSSIA'S PRIORITY INDUSTRIES

The paper examines the system of further professional education (FPE) at MEPhI and its role in securing Russia's technological sovereignty by providing advanced training to highly qualified personnel in priority areas

В достижении каждой из 7 национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года, определенных в Указе Президента России В.В. Путина (07.05.2024 г.), в том числе, в обеспечении технологического лидерства, устойчивой и динамичной экономики, цифровой трансформации управления, экономики и социальной сферы, значительную роль должно сыграть ДПО. Именно ДПО позволяет достаточно быстро и эффективно готовить кадры по востребованным обществом, экономикой, наукой и др. направлениям. В этом смысле, система ДПО НИЯУ МИФИ, включающая как московскую площадку, так и филиальную сеть Университета, максимально сфокусирована на разработку и реализацию приоритетных для России национальных задач. Способствует развитию системы ДПО Университета участие в программах «Приоритет-2030»[1] и «Развитие НИЯУ МИФИ во взаимодействии с Госкорпорацией «Росатом» до 2030 года».

Так, в 2024 году в системе ДПО НИЯУ МИФИ проведено обучение ~15 тыс. чел. более чем по 300 программам ДПО (из них 8,5 тыс. чел. на факультете повышения квалификации и переподготовки кадров НИЯУ МИФИ (ФПКПК НИЯУ МИФИ)). Важно отметить, что ФПКПК НИЯУ МИФИ в последние 3 года кратно увеличил число обучающихся, и за это время обучил более 25 тыс. чел. Среди прошедших обучение - специалисты высокотехнологичных предприятий и организаций реального сектора экономики, научно-педагогические работники вузов (более чем из 300 российских университетов), медицинские работники, учителя, органов местного самоуправления более чем из 20 городов атомной отрасли, а также преподаватели и сотрудники НИЯУ МИФИ и др.

Среди наиболее востребованных направлений повышения квалификации и профессиональной переподготовки - искусственный интеллект в разных сферах (программы “Анализ данных и машинное обучение”, “Искусственный интеллект в транспортной отрасли”, “Проблемы и возможности использования искусственного интеллекта в образовании”, “Основы искусственного интеллекта для учителей школ” и др.), информационная безопасность (программы “Основы прикладной криптографии”, “Методы обнаружения и противодействия компьютерным атакам в сетях”, “Обеспечение безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры”, “Интеллектуальные технологии как инструмент противодействия киберугрозам в системе национальной оценки рисков ПОД/ФТ” и др.), беспилотные авиационные системы (программы “Эксплуатация беспилотных авиационных систем”, “Сфера применения беспилотных авиационных систем и основы эксплуатации” и др.), перспективные медицинские технологии (программы “Современные технологии биомедицины”, “Перспективные технологии ядерной медицины для внедрения в практику высокотехнологичных центров РФ” и др.), современные инженерные технологии (программы “Основы проектирования и 3D-моделирования”, “Технологии 3D-печати”, “Специалист по 3D-печати и реверс-инжинирингу” и др.), ускорители заряженных частиц, лазерно-плазменные источники синхротронного излучения, лазеры экстремальной мощности, блокчейн-технологии, экономическое мышление инженеров и др.

Таким образом, система ДПО НИЯУ МИФИ активно развивается и вносит значительный вклад в обеспечение технологического суверенитета России благодаря опережающей подготовке большого количества высококвалифицированных кадров по приоритетным направлениям развития страны.

Список литературы:

- Гусева А.И., Калашник В.М., Каминский В.И., Киреев С.В. Первый год реализации программы «Приоритет-2030»: позитивные результаты и проблемные направления университетов исследовательского трека // Высшее образование в России. 2023. Т. 32. №. 3. С. 9–25. DOI: 10.31992/0869-3617-2023-32-3-9-25.

Б.Г. КИСЕЛЁВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КУРС “ВВЕДЕНИЕ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ” В ИНЖЕНЕРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Рассмотрены содержание и методическое наполнение курса «Параллельные вычисления и суперкомпьютеры» для бакалавров НИЯУ МИФИ.

B.G. KISELEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

COURSE “INTRODUCTION TO PARALLEL COMPUTING AND SUPERCOMPUTERS” AT THE ENGINEERING RESEARCH UNIVERSITY

The content and methodological content of the course "Parallel computing and supercomputers" for bachelors of the National Research Nuclear University MEPhI are considered.

Важнейшей составляющей подготовки инженера исследователя является освоение современных информационных технологий. Однако в современном высшем образовании такая подготовка страдает определенной инерцией с точки зрения использования технических средств, на базе которых реализуются изучаемые информационные технологии. Основным инструментом является персональный компьютер с операционной системой Windows, iOS или Unix. При этом за рамками учебных программ оказываются современные суперкомпьютеры, с помощью которых решаются наиболее сложные из актуальных задач в различных областях науки и техники.

Первый опыт освоения суперкомпьютерных вычислений в учебном процессе был реализован, начиная с 2017 года, в Предуниверситарии НИЯУ МИФИ. В рамках этого эксперимента опробованы различные методические и дидактические подходы, на основе которых может быть реализован соответствующий учебный процесс [1].

Следующим этапом внедрения дисциплин, связанных с практическим освоением суперкомпьютерных вычислений, является курс «Параллельные вычисления и суперкомпьютеры», разработанный на кафедре «Информатика и процессы управления» НИЯУ МИФИ. Данный курс является практическим введением в технологии научных и инженерных расчетов на современных суперкомпьютерах, которыми оснащен Вычислительный центр НИЯУ МИФИ.

В рамках курса рассматриваются следующие темы.

1	Первое знакомство с суперкомпьютером.	8	Группы процессов
2	Обмен сообщениями в среде MPI.	9	Генетические алгоритмы и MPI.
3	Ускорение вычислений при параллельной обработке.	10	Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP
4	Методы коллективного взаимодействия при параллельных вычислениях.	11	Решение систем линейных уравнений и сортировка с использованием технологии OpenMP.
5	Создание параллельных анимаций.	12	Визуализация решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с применением технологии OpenMP.
6	Моделирование движения по орбите.	13	OpenMP и Cython.
7	Моделирование гравитационного взаимодействия тел с сопоставимой массой	14	Введение в параллельные вычисления с использованием технологии CUDA

Все темы иллюстрируются программами на Python, реализованными на суперкомпьютерах НИЯУ МИФИ. По каждой теме подготовлены проектные задания для самостоятельной работы студентов.

Детально с материалами курса можно познакомиться на интернет ресурсе <http://ftp.csdep.mephi.ru/kiselev/SC-2024/>.

Список литературы

1. Киселёв Б.Г. Суперкомпьютер в физико-математическом лицее. “Теория и практика информатизации образования: внедрение результатов и перспективы развития”: сборник научных трудов юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 35-летию становления информатизации отечественного образования, Москва, 19 декабря 2019 г. - Москва : Изд-во АЭО, 2020. – 619 с.

В.М. КОРОБОВ, Б.Е. ЛЕВКОВИЧ, Г.П. ТЕРЕХОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБУЧЕНИИ САПР T-FLEX СТУДЕНТОВ НИЯУ МИФИ

В докладе рассмотрены методические аспекты процесса обучения кафедрой «Инженерная графика» студентов первого курса технических кафедр НИЯУ МИФИ современному САПР T-Flex. Предложено внедрение в учебный процесс практико-ориентированного подхода для формирования у студентов практических умений через выполнение реальных практических заданий. Рассмотрены требования к формированию и пример учебной Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), позволяющей реализовывать практико-ориентированный подход при изучении студентами САПР T-Flex.

V.M. KOROBOV B.E. LEVKOVICH, G.P. TEREKHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

A PRACTICE-ORIENTED APPROACH IN TEACHING T-FLEX CAD TO STUDENTS OF NRNU MEPhI

The report examines the methodological aspects of the teaching process of the Engineering Graphics Department to first-year students of the technical departments of the National Research Nuclear University MEPhI in modern CAD T-Flex. It is proposed to introduce a practice-oriented approach into the educational process for the formation of students' practical skills through the implementation of real practical tasks. The requirements for the formation and example of educational Research and development (R&D), which allows to implement a practice-oriented approach when students study CAD T-Flex, are considered.

Традиционно инженерная подготовка студентов кафедрой «Инженерная графика» базировалась на функциональном черчении, включая автоматизированные инструменты создания чертежей и оформления (САПР T-Flex). В настоящее время профессиональным инженерам и проектировщикам, наряду с функциональным черчением, требуется широкий набор инструментов для сложного моделирования в мехатронике и робототехнике (поверхностное моделирование, кинематический анализ, расчёт методом конечных элементов и так далее).

САПР T-Flex ориентирован на комплексное решение задач, связанных с проектированием, анализом и управлением жизненным циклом изделия, то есть ориентирован на полный цикл НИОКР. [1]

На кафедру «Инженерная графика» приходят студенты первого курса, у которых отсутствует инженерная подготовка и практические навыки работы с САПР. Невозможно осваивать навыки работы в САПР T-Flex на абстрактных примерах. Это противоречие помогает разрешить практико-ориентированный подход в учебном процессе. [2] Это метод обучения, направленный на освоение образовательной программы и формирование практических умений через выполнение реальных практических заданий и упражнений.

В докладе приведён пример практико-ориентированного подхода в учебном процессе из предметной области конструирования и изготовления радио электронной аппаратуры (РЭА). Требуется понятная студентам учебная НИОКР РЭА, позволяющая проектировать и изготавливать конкретное радио электронное устройство. Технология изготовления учебного изделия должна базироваться на технологической базе, материально-технических и производственных ресурсах кафедры «Инженерная графика». Ключевое требование к учебной НИОКР РЭА - технологическая и структурная совместимость с САПР T-Flex. Это достигается совпадением стадий разработки и изготовления учебной НИОКР РЭА, структурно совпадающими со схемой организации работ САПР T-Flex (Рис.1).

В качестве учебная НИОКР РЭА был предложен измерительный комплекс “Время-температура”, разработанный на кафедре «Автоматика» для проведения учебных занятий по курсу «Первичные профессиональные навыки». Технологические этапы разработки и изготовления ИКВТ совпадают со стадиями разработки РЭА. Учебный процесс по САПР T-Flex также был структурирован кафедрой «Инженерная графика» под основные этапы разработки РЭА. [3]

Использование ИКВТ в качестве учебной НИОКР РЭА позволяет реализовать практико-ориентированный подход и повысить качество обучения САПР T-Flex студентов НИЯУ МИФИ.



Рис. 1. Схема организации работ САПР T-Flex

Список литературы

1. Официальный сайт T-Flex: <https://tflex.ru/>
2. Международная инициатива CDIO <http://www.cdio.org>
3. X Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаза - 2024" Тема доклада: В.М. КОРОБОВ, Б.Е. ЛЕВКОВИЧ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА НА СЛУЖБЕ «ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКИ». с. 453.

А.В. КОШЕЛКИН, О.В. ЩЕРБАЧЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

НЕПРЕРЫВНОЕ ИНКЛЮЗИВНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Рассмотрена методика преподавания курса общей физики (углубленного уровня), опробованная на кафедре общей физики Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, основанная на непрерывном инклюзивно-динамическом образовательном процессе, а также на представлении единой, непротиворечивой и постоянно развивающейся системе естественнонаучных знаний

A.V. KOSHELKIN, O.V. SHCHERBACHEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CONTINUOUS INCLUSIVE-DYNAMIC PHYSICAL EDUCATION

The methodology of teaching a course in general physics (advanced level), tested at the Department of General Physics of the National Research Nuclear University MEPhI, based on a continuous inclusive-dynamic educational process, as well as on the concept of a unified, consistent and constantly evolving system of natural science knowledge is considered

Эксперимент индивидуальных образовательных траекторий, проводимый на ряде кафедр Института общей профессиональной подготовки НИЯУ МИФИ, включая кафедру общей физики, позволил интенсифицировать процесс модернизации сложившегося несколько десятилетий назад курса общей физики, основанного на учебнике И.В. Савельева, и методики его преподавания, внеся в нее давно напрашивающиеся корректировки. Опыт апробации модернизированного курса осуществляется на базе групп, обучающихся по программе углубленного уровня, и на наш взгляд, может быть признан вполне успешным.

Основные принципы построения модернизированного курса таковы:

- 1) физика есть часть единой непротиворечивой и самосогласованной системы знаний об окружающем мире, находящейся в постоянном развитии и совершенствовании;
- 2) все разделы физики взаимосвязаны; деление физики на разделы является неизбежным следствием ограниченности моделей, выбираемых для описания природных явлений, и является необходимой формой систематизации знаний;
- 3) развитие науки, в частности, появление новых областей знания есть всегда выход за рамки существующих моделей;
- 4) каждый раздел физики открыт для дальнейших исследований; не существует полностью разработанных и окончательно решенных проблем; физика – диалектически развивающаяся, «живая» наука.

Ключевые требования к курсу могут быть сформулированы следующим образом:

- 1) синхронность (лекция - семинар - лабораторная работа);
- 2) самосогласованность (некоторые части лекции являются задачами для семинарских занятий);
- 3) инклюзивность (вовлечение студентов в образовательный процесс)
- 4) динамизм (творческая, исследовательская работа студентов).

Последние два пункта предполагают систему бонусов.

Методика проведения лекций и семинаров должна основываться на принципе диалога между преподавателем и студентом (в случае лекций – с доминированием лектора, в случае семинаров – как правило, с доминированием студентов, когда преподаватель выполняет роль модератора). Недопустимым является использование готовых конспектов и презентаций, а демонстрации на лекциях должны быть исключительно «натурыми» (не симуляциями).

В качестве исследовательской работы студенты решают задачи, которые формулирует лектор, однако студентам, по согласованию с лектором, разрешается как корректировка поставленных задач, так и самостоятельная постановка интересующих их задач. Большая часть задач может формулироваться совместно с профильтрующими кафедрами. По окончании семестра проводится конференция, на которой студенты представляют результаты своих исследований. Лучшие работы могут быть представлены на студенческих научно-исследовательских конференциях.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1-5. – Москва, 2021.

Е.В. КУЗЬМИНА
Школа инноваций и креативного мышления ИКРА
МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВОВЛЕКАЮЩЕГО ОБУЧЕНИЯ CRAFTED

В работе рассмотрены стадии креативного процесса и ключевые элементы методологии CRAFTED: фундаментальные понятия, основные механизмы анализа образовательной программы и инструменты создания новых решений.

E.V. KUZMINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

METHODOLOGY FOR CREATING ENGAGING LEARNING CRAFTED

The work examines the stages of the creative process and the key elements of the CRAFTED methodology: fundamental concepts, basic mechanisms for analyzing the educational program and tools for creating new solutions.

В современном мире быстрых изменений и глобальных вызовов образовательные курсы не могут оставаться статичными. Потребности аудитории студентов, технологические инновации и социально-экономические изменения требуют постоянной адаптации и обновления образовательных программ. Курсы, разработанные несколько лет назад, могут не терять свою фундаментальность и актуальность, но не отвечать потребностям студентов и рынка труда.

Для эффективной адаптации образовательных решений необходимо использовать гибкие и креативные подходы в методической работе. Одним из таких инструментов является методология “CRAFTED”. Эта методология не предлагает новую образовательную парадигму, а служит вдохновляющим инструментом для методистов и преподавателей, позволяя критически переосмыслить содержание курсов, структуру занятий и способы взаимодействия с аудиторией. “CRAFTED” помогает находить новые идеи и решения, делая образовательные программы более динамичными, практикоориентированными и вовлекающими.

Список литературы

1. Лебедев В. С., Илишкина Д. А. CRAFT/ed: креативные методики для образования. — Москва: Бослен, 2022. — 176 с. ISBN 978-5-91187-409-4.

Н.В. БУДАРАГИН, О.Н. ГУСТУН, Ю.К. ЛАВДИНА, Э.И. МАСЯГУТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

БАЛЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

Описаны принципы построения балльной системы оценивания результатов обучения студентов, предназначенной для применения при адаптивном управлении процессом обучения с использованием информационно-образовательной среды. Рассмотрены результаты применения балльной системы оценивания студентов первого курса инженерно-физических специальностей НИЯУ МИФИ по дисциплине «Информатика» в 2023–2024 годах.

N.V. BUDARAGIN, O.N. GUSTUN, Y.K. LAVDINA, E.I. MASYAGUTOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE POINT ASSESSMENT SYSTEM FOR ADAPTIVE INFORMATION AND EDUCATIONAL ENVIRONMENT

The principles of constructing the point assessment system for use in adaptive control of the learning process using the information and educational environment are described. The results of the point assessment system using for first-year engineering and physical specialties students of National Research Nuclear University MEPhI in the course “Informatics” in 2023-2024 are considered.

Адаптивное управление процессом обучения требует проведения регулярной оценки состояния объекта управления, в роли которого выступает обучаемый. Причем настройка структуры и параметров управляющего устройства в динамике требует регулярного измерения уровней знаний и умений студентов. Для организации и управления процессом обучения студентов инженерно-физических специальностей НИЯУ МИФИ по дисциплине «Информатика» используется адаптивная информационно-образовательная веб-среда, в которой студенты получают доступ к учебному контенту, выполняют тесты, загружают решения и знакомятся с результатами их проверки, могут вести диалог с преподавателем в чате, отслеживают свои текущие баллы.

Содержание каждого семестра разделено на темы, сгруппированные в несколько разделов. Качество подготовки студента по текущей теме проверяется в начале соответствующего практического занятия – в веб-среде студенты проходят короткое тестирование. По результатам выполнения теста по текущей теме каждый студент получает задания для лабораторной работы, которое он должен выполнить очно в компьютерном классе, и задание для самостоятельной работы (домашнее задание). Сложность и объем этих заданий зависит от успешности выполнения теста: чем выше результат теста, тем выше сложность и объем заданий. При этом за выполнение более сложных и трудоемких заданий студент может получить большее количество баллов.

После освоения всех тем раздела студенты проходят итоговое тестирование по содержанию раздела. Таким образом к концу освоения раздела максимальные возможные баллы за этот раздел у каждого студента различаются. При настройке балльной системы значения баллов рассчитываются так, чтобы студент, успешно выполнивший тесты и получающий сложные и трудоемкие задания, мог набрать в течение семестра до 100 баллов. В этом случае он может быть освобожден от итоговой аттестации (зачета или экзамена).

На рис. 1 представлено распределение итоговых баллов по дисциплине «Информатика» (основной уровень), полученных 135 студентами Института лазерных и плазменных технологий (ЛаПлаз) НИЯУ МИФИ в 1-м семестре 2023/2024 учебного года.

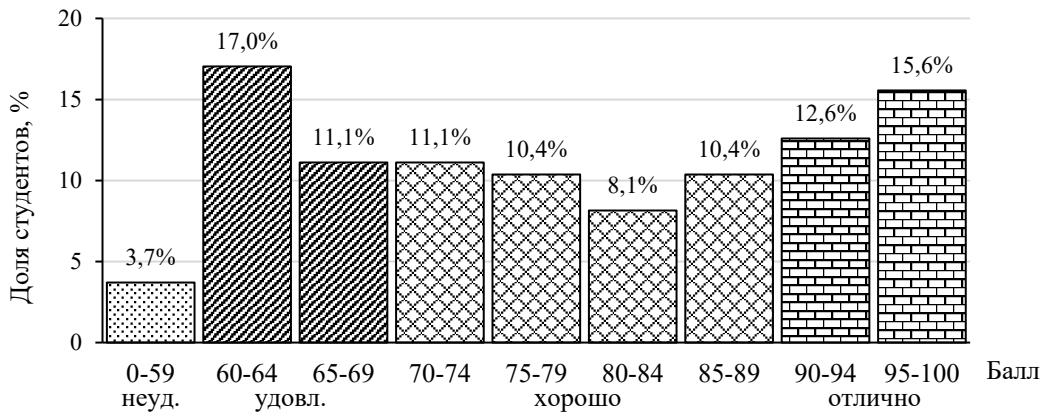


Рис. 1. Распределение итоговых баллов студентов ЛаПлаз в 1-м семестре 2023/2024 уч. года.

Применение разработанной балльной системы при адаптивном управлении процессом обучения приводит к повышению мотивации к обучению, стимулирует самостоятельную подготовку студентов, способствует формированию индивидуальной траектории освоения учебного материала.

А.Д. МОДЯЕВ, Н.М. ЛЕОНОВА, О.Н. ГУСТУН
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

УРОВНЕВАЯ ИНФОРМАТИКА В НИЯУ МИФИ

Рассмотрены результаты обучения студентов инженерно-физических специальностей НИЯУ МИФИ по дисциплине «Информатика», использующей два уровня: основной и углубленный. Программы уровневого обучения отличаются разной степенью трудоемкости, количеством тем, сложностью задач и объемами заданий.

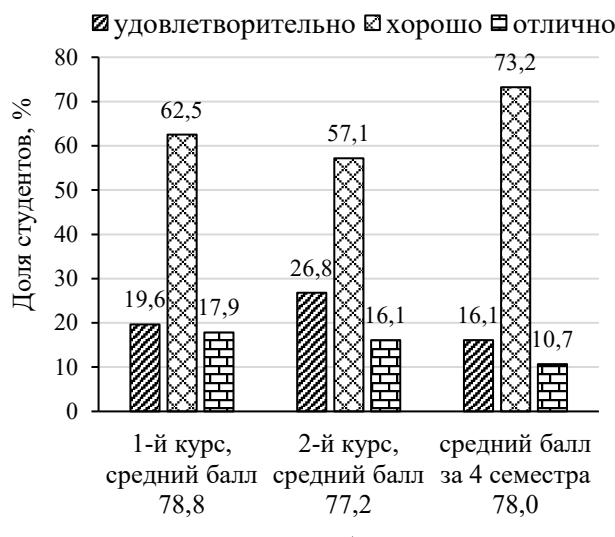
A.D. MODYAEV, N.M. LEONOV, O.N. GUSTUN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MULTILEVEL INFORMATICS IN NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

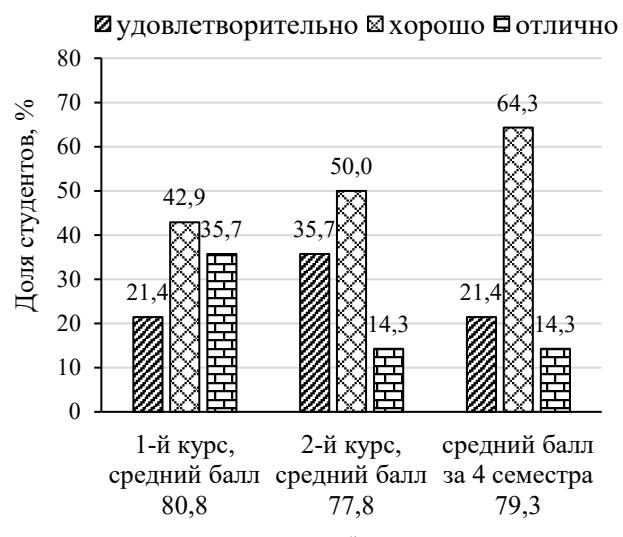
The learning results of engineering and physical specialties students of National Research Nuclear University MEPhI in the course “Informatics” by two levels: basic and advanced are considered. The learning program levels differ by the degree of workload, the number of topics, the complexity of tasks and the volume of assignments.

Доклад посвящен исследованию индивидуальных образовательных траекторий студентов НИЯУ МИФИ с использованием уровневых дисциплин. При этом учитываются индивидуальные особенности, исходный уровень подготовки, мотивация, личные предпочтения и когнитивные особенности студентов.

Приводятся экспериментальные данные, полученные в процессе обучения в течение 2021–2024 годов на основе обобщенного показателя среднего балла. Итоговые результаты обучения, усредненные за четыре семестра, представлены на рис. 1. На диаграммах приведены доли студентов основного (рис. 1 а) и углубленного (рис. 1 б) уровней, получивших оценки «удовлетворительно» (от 60 до 69 баллов), «хорошо» (от 70 до 89 баллов), «отлично» (от 90 до 100 баллов) по шкале балльных оценок.



a)



б)

Рис. 1. Итоговые результаты обучения студентов: а) – основного уровня, б) – углубленного уровня.

Средние баллы обучения, полученные в результате обработки аттестационных данных студентов, используются при определении индикатора уровня обучения $\Delta P = (P_2/P_1) \cdot (q_2/q_1) - 1$, где P_1 и P_2 – оценки результатов обучения, q_1 и q_2 – показатели сложности задач и объемов заданий на основном (индекс 1) и углубленном (индекс 2) уровнях.

Положительные значения индикаторов уровня свидетельствуют о сбалансированности обучения на основном и углубленном уровнях. Это позволяет сделать вывод о том, что студенты на углубленном уровне успешноправляются с повышенными уровнями сложности задач и объемами заданий.

Полученные результаты свидетельствуют о повышении эффективности уровневой дисциплины по обобщенному показателю среднего балла более, чем на 22%, по сравнению с традиционным обучением. При этом трудоемкость углубленного уровня превышает аналогичное значение основного уровня в 1,25 раза по сложности задач и в 1,2 раза по объему заданий.

А.Н. МАКСИМОВА, А.Ю. МАТРОНЧИК, С.С. МУРАВЬЕВ-СМИРНОВ, Н.А. КЛЯЧИН,

Д.А. САМАРЧЕНКО, Е.М. СЕРЕБРЯКОВА, В.А. ШИЛОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «КВАНТОВЫЙ ЛАСТИК»: РЕАЛИЗАЦИЯ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ НИЯУ МИФИ

Описывается реализация лабораторной работы «Квантовый ластик» в рамках лабораторного практикума 5 семестра на кафедре Общей физики. Экспериментальная часть работы позволяет наблюдать эффект стирания информации о траектории фотонов. В дополнение к экспериментальной написана программная часть, позволяющая определить видность интерференционной картины на экране в зависимости от углов поворота поляризаторов.

A.N. MAKSIMOVA, A.Y. MATRONCHIK, S.S. MURAVYOV-SMIRNOV, N.A. KLYACHIN, D.A. SAMARCHEVKO, E.M. SEREBRYAKOVA, V.A. SHILOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

LABORATORY WORK "QUANTUM ERASER": IMPLEMENTATION IN THE GENERAL PHYSICS COURSE OF THE NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

The implementation of the laboratory work "Quantum Eraser" in the framework of the 5th semester laboratory workshop at the Department of General Physics is described. The experimental part of the work allows us to observe the effect of erasing information about the trajectory of photons. In addition to the experimental one, a software part has been written that makes it possible to determine the visibility of the interference pattern on the screen depending on the rotation angles of the polarizers.

Лабораторная работа для изучения эффекта «квантового ластика» вводится в методическую базу лабораторного практикума с целью внедрения в курс общей физики основ современных квантовых технологий. Особенностью работы является написанная нами программа часть. Экспериментальная часть выполняется на оборудовании, выпущенном фирмой ThorLabs [1] и состоит в визуальном наблюдении эффекта стирания информации о траектории фотона при установке поляризатора перед экраном (Polarizer 45, рис. 1). В дополнение к эксперименту нами была разработана программная часть. Программа позволяет рассчитывать относительные величины компонент вектора \mathbf{E} фотонов, прошедших по верхнему и нижнему плечу интерферометра Маха-Цандера при произвольных углах поворота поляризатора. При выполнении работы необходимо определить зависимость видности интерференционных полос от угла поворота верхнего поляризатора и объяснить полученные зависимости. Работа «Квантовый ластик» реализована также в учебных лабораториях других вузов [2,3].

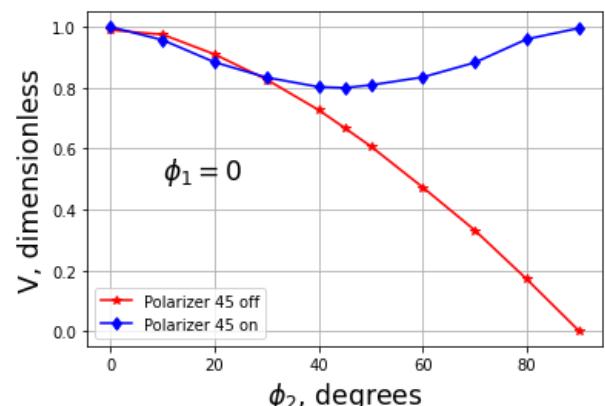
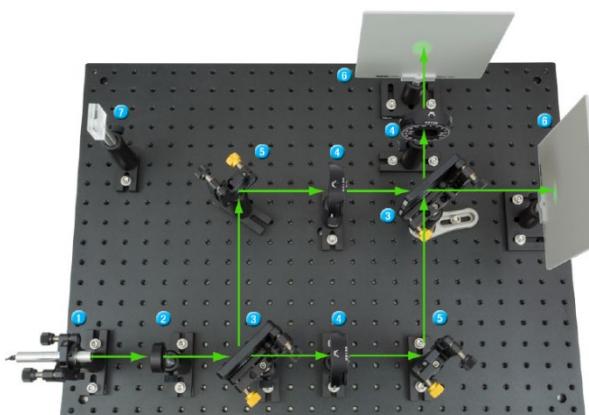


Рис. 1. Установка для наблюдения эффекта квантового ластика (слева) и зависимость видности интерференционных полос от угла поворота верхнего поляризатора при нижнем поляризаторе, выставленном в положение 0.

Работа выполнена в рамках создания учебно-научного комплекса «Физический практикум по квантовым технологиям» для реализации приоритетных направлений подготовки, предусмотренных программой Приоритет 2030 НИЯУ МИФИ.

Список литературы

1. <https://www.thorlabs.com/>.
2. Киктенко Е. О., Афонькина Н. А., Скуйбин Б. Г. //Физическое образование в вузах. 2017. Т. 23. №. 4. С. 85-94.
3. Андрюнин А. И., Былина М. С. //Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). 2022. С. 95-100.

Т.В. НИКИТИНА

Снежинский физико-технический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,
Снежинск, Россия

ФАКТОРЫ ВОВЛЕЧЕННОСТИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ПО ФИЗИКЕ В ВУЗЕ

В докладе раскрываются факторы, способствующие успешному освоению курса физики в вузе, который в свою очередь является необходимой базой для получения качественного образования по техническому направлению. Проанализированы результаты наблюдения за образовательным процессом, данные опроса студентов.

T.V. NIKITINA

Snezhinsk Institute of Physics and Technology, branch of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia

FACTORS OF ENGINEERING STUDENTS' ENGAGEMENT IN THE EDUCATIONAL PROCESS IN PHYSICS AT THE UNIVERSITY

The report reveals the factors that contribute to the successful mastering of the physics course at the university, which in turn is the necessary basis for obtaining a quality education in the technical field. The results of observation of the educational process and data from a student survey were analyzed.

Содержание курса физики в вузе опирается на междисциплинарные и преемственные связи физики и математики и предшествующую школьную физико-математическую подготовку обучающихся. Социально-экономическая ситуация в стране обуславливает существенные противоречия в сфере физико-математического образования как на ступени среднего, так и высшего профессионального образования.

В работе представлены результаты исследования вовлеченности студентов физико-технических специальностей в изучение физики в вузе. На основе данных опроса студентов выявлены возможные направления совершенствования образовательного процесса по физике для устранения существующих противоречий.

Наблюдение за образовательным процессом в вузе показало, что школьная подготовка по физике и математике влияет на вовлеченность студентов в изучение физики в вузе. По мнению ряда исследователей, [1, 2], ключевым критерием качества высшего образования является академическая вовлеченность студентов, под которой понимается степень активного участия студента в деятельности, связанной с освоением образовательной программы.

В результате проведенных наблюдений нами выявлена возможность уровневой дифференциации студентов по степени их вовлеченности в образовательный процесс по физике на основе предшествующего образовательного опыта по физике и математике (средняя школа) и удовлетворенности образовательным процессом по физике: 1) активная вовлеченность; 2) пассивная вовлеченность; 3) невовлеченность. Был разработан опрос для студентов для осуществления количественной оценки вовлеченности студентов в изучение курса физики. В исследовании принимали участие студенты 2 и 3 курса очной формы обучения Снежинского физико-технического института НИЯУ МИФИ, обучающиеся по направлениям 14.03.02 - Ядерные физика и технологии, 09.05.01 - Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения, 15.05.01 - Проектирование технологических машин и комплексов. Для опроса студентов были подобраны вопросы, позволяющие отследить уровень их вовлеченности в образовательный процесс по физике и установить его причины. Вопросы анкеты ориентированы на конкретизацию школьного и вузовского учебного опыта обучающихся, выявление эмоционального настроя обучающихся при прохождении контрольно-рейтинговых мероприятий по физике, выявление мотивов обучения.

Были получены следующие результаты. Ответы студентов на вопросы, связанные с поддержкой образовательного процесса по физике, свидетельствуют о том, что отобранное содержание, темп обучения подходят для студентов, уровень сложности и трудности предлагаемых заданий соответствует их познавательным возможностям. При этом наиболее эффективными для поддержки образовательного процесса, по мнению обучающихся, являются цифровые средства обучения: электронный тренажер, видео контент с разбором теоретических и практических вопросов. Одним из ключевых направлений развития образовательного процесса в вузе является совершенствование балльно-рейтинговой системы оценки учебных достижений студента, которая делает для студента «прозрачной» структуру курса и требования к его освоению. Важным направлением является увеличение доли экспериментальных работ по физике в структуре курса, об этом также свидетельствуют данные опроса студентов.

Список литературы

1. Вилкова К. А., Малопонок Н. Г. Измерение учебной вовлеченности студентов как инструмент оценки качества российского высшего образования: информационный бюллетень. Москва. НИУ ВШЭ, 2022.44 с.
2. Павлова Е.В. Типологические особенности «ресурса вовлеченности» студентов современного вуза // Мир науки. Педагогика и психология. 2021. №4.
3. Пырьев Е. А. Эмоции в структуре мотивации учебно-профессиональной деятельности студентов вуза // Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова. 2016. Т. С.107 – 110.

А.Л. ВДОВКИН, С.А. КОРОБОВ, М.И. КОНЬКОВА

Саровский физико-технический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ИНТУИТИВНОГО И ФОРМАЛЬНОГО АСПЕКТОВ В ОБУЧЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

Выделены основные составляющие интуитивного и формального аспектов в обучении математическим дисциплинам студентов технических направлений подготовки. Выбрана математическая дисциплина, в рамках изучения которой рассматриваются приведённые аспекты. Поставлена и решена задача с опорой на образные представления, который предполагает использование графического калькулятора Desmos. Сделан вывод о необходимости использования интуитивного и формального аспектов в их диалектическом единстве.

A.L. VDOVKIN, S.A. KOROBOV, M.I. KONKOVA

Sarov Institute of Physics and Technology is a branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Nuclear University "MEPhI"

THE MAIN COMPONENTS OF THE INTUITIVE AND FORMAL ASPECTS IN TEACHING MATHEMATICAL DISCIPLINES TO STUDENTS OF TECHNICAL FIELDS OF STUDY

The main components of the intuitive and formal aspects in teaching mathematical disciplines to students of technical fields of study are highlighted. A mathematical discipline has been chosen, in the framework of which the above aspects are considered. A problem based on figurative representations has been posed and solved, which involves the use of the Desmos graphing calculator. The conclusion is made about the need to use intuitive and formal aspects in their dialectical unity.

Основной составляющей интуитивного аспекта в обучении математическим дисциплинам является графическо-словесная. К формальному аспекту в обучении математическим дисциплинам можно отнести знаково-символьное описание объекта. Студенты технических направлений подготовки изучают множество математических дисциплин. Одной из основных является аналитическая геометрия. Итак, поставим перед собой задачу, на примере которой опишем рациональное соотношение интуитивного и формального в учебном процессе.

Задача. Дан эллипс заданный своим общим уравнением $x^2p + y^2p + 2qxy - 10\sqrt{2}b^2x - 4\sqrt{2}a^2y + 10\sqrt{2}b^2y - 4\sqrt{2}a^2y + 50b^2 + 8a^2 - 2a^2b^2 = 0$, где $p = a^2 + b^2, q = a^2 - b^2$. Найти координаты точки C на данной линии такую, чтобы площадь треугольника ABC была наибольшей, если $A\left(\frac{b+7}{\sqrt{2}}, \frac{b-3}{\sqrt{2}}\right), B\left(\frac{a+7}{\sqrt{2}}, -\frac{a+3}{\sqrt{2}}\right), a > b > 0$.

Решение: решим, используя лишь знаково-символьную составляющую. Отметим, что третий член уравнения $2qxy \neq 0$, что означает поворот эллипса относительно начала декартовых координат. Выведем уравнение эллипса в декартовых координатах. Определим, что угол поворота $\varphi = \frac{\pi}{4}$. Теперь найдём новые координаты эллипса в декартовой системе без сдвига и поворота. Проведём некоторые математические преобразования над общим уравнением, а так же последовательно воспользовавшись формулами $x_1 = x\cos\varphi - y\sin\varphi, y_1 = x\sin\varphi + y\cos\varphi, x_1, y_1$ где - координаты без поворота осей и выражениями $x = x_1 - x', y = y_1 - y', x', y'$ - начало координат, полученное сдвигом. В итоге имеем, $\frac{(x_1-5)^2}{a^2} + \frac{(y_1-2)^2}{b^2} = 1$, или $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$. $A\left(\frac{b+7}{\sqrt{2}}, \frac{b-3}{\sqrt{2}}\right) \rightarrow A(0; b), B\left(\frac{a+7}{\sqrt{2}}, -\frac{a+3}{\sqrt{2}}\right) \rightarrow B(a; 0)$. А теперь раскроем графическо-словесную составляющую с помощью калькулятора Desmos.

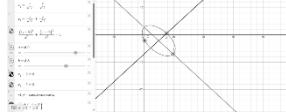


Рис. 1. Эллипс в “эталонной” декартовой системе координат

Затем отыскиваем максимум функции площади треугольника и так находим координаты точки C_{max} или же подбираем в программе Desmos параметры, чтобы площадь стала максимальной. Решение задачи дало понимание того, что в математическом образовании интуитивно-образные и формально-логические средства обучения следует представлять их в диалектическом единстве для полноценного усвоения обучаемыми основных понятий курса и способов математической деятельности, понимания ими фундаментальных идей и теорем, формирования у них представлений о структуре математической теории [1].

Список литературы

1. Конькова, М.И. Проблема формального и интуитивного в теории и практике обучения математике / М.И. Конькова // В мире научных открытий. – 2011. – №. 9.3 (31). – С. 725–732.

Н.А.ПЕВНЕВА, О.В.ЛИННИК, А.И.ПОПОВА

Снежинский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,
Снежинск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ЗАТО НА ПРИМЕРЕ СФТИ НИЯУ МИФИ

Приводятся результаты опроса по выявлению влияния социальных аспектов, образовательной среды и карьерных перспектив на выбор местных и иногородних абитуриентов в пользу получения высшего образования в интересах Росатома в условиях ЗАТО.

N.A.PEVNEVA, O.V.LINNIK, A.I.POPOVA

Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk, Russia

A STUDY OF FACTORS OF ATTRACTIVENESS OF ENGINEERING AND TECHNICAL EDUCATION IN CLOSED CITIES ON THE EXAMPLE OF SFTI NRNU MEPhI

The results of a survey to identify the impact of social aspects, educational environment and career prospects on the choice of local and nonresident applicants in favor of obtaining higher education in the interests of Rosatom in closed cities are presented.

Высшие учебные заведения в закрытых административно-территориальных образованиях (ЗАТО) сталкиваются с проблемой привлечения и удержания молодежи [1]. Снежинский физико-технический институт (СФТИ) НИЯУ МИФИ, несмотря на свою локализацию, на протяжении нескольких лет демонстрирует растущие контрольные цифры приема и повышение среднего балла ЕГЭ поступивших [2].

Для выявления факторов привлекательности получения инженерно-технического образования в ЗАТО, СФТИ НИЯУ МИФИ провел опрос среди снежинских и иногородних студентов 1-2 курсов по специальностям «Ядерные физика и технологии» и «Боеприпасы и взрыватели» (именно по этим направлениям обучается большее число высокобалльников), включающий вопросы о профессиональном развитии, безопасности, образовательной и социальной инфраструктуре, а также перспективах после обучения.

Анализ результатов опроса студентов показал, что они больше всего ценят возможности участия в научных проектах и тесную связь института с предприятиями Росатома, обеспечивающую перспективы профессионального роста. Так же студенты отметили высокий уровень безопасности и экологической обстановки в Снежинске как значимые факторы при выборе места учебы. Большинство опрошенных выразили заинтересованность в трудоустройстве на предприятиях Росатома после окончания учебы. При этом иногородние абитуриенты указали более широкий спектр рассматриваемых для поступления вузов, чем снежинские, с акцентом на Уральский федеральный университет (УрФУ) как основной альтернативный вуз.

Диаграмма 1. Факторы, повлиявшие на решение о поступлении в СФТИ НИЯУ МИФИ опрошенных студентов, %



Сравнительный анализ ответов снежинских и иногородних студентов выявил, что абитуриенты с ЕГЭ ниже 180 баллов ориентируются на финансовые и профессиональные преимущества, в то время как абитуриенты с баллами более 180 - больше интересуются уникальными образовательными программами и участием наставников. Профориентационные мероприятия [3] и советы родителей играют меньшую роль, особенно среди снежинских школьников.

Результаты исследования будут полезны для планирования будущих приемных кампаний.

Список литературы

- Информационно-аналитические материалы по результатам проведения мониторинга деятельности образовательных организаций высшего образования // Главный информационно-вычислительный центр : официальный сайт. –URL: <https://monitoring.miccedu.ru/iam/2024/vpo/inst.php?id=10003309> (дата обращения: 19.12.2024).
- С инженерами по пути // СФТИ НИЯУ МИФИ : официальная группа. - URL: https://vk.com/wall-71669107_4237 (дата обращения: 07.10.2024).
- Развитие образовательных и социальных практик привлечения молодежи в города Росатома // СФТИ НИЯУ МИФИ : официальный сайт. - URL: <https://www.sphti.ru/открой-себя-в-себе-мифи/> (дата обращения: 20.08.2024).

А.М. КОЛМОГОРЦЕВ, Н.А. ПЕВНЕВА, О.В. ЛИННИК

Снежинский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Снежинск,
Россия

ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ МАГИСТРАТУРА В ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ: ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Представлен опыт создания магистерской программы «Физико-математическое образование и информационные технологии» в Снежинском физико-техническом институте НИЯУ МИФИ. Рассмотрены предпосылки открытия программы, ее цели, особенности и структура. Показаны механизмы взаимодействия с ведущими педагогическими вузами и работодателями при разработке и реализации программы. Проанализированы перспективы развития педагогического образования на базе инженерно-технических вузов.

A.M. KOLMOGOROVSEV, N.A. PEVNEVA, O.V. LINNIK

*Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Snezhinsk, Russia*

PEDAGOGICAL MASTER'S DEGREE IN ENGINEERING AND TECHNICAL UNIVERSITY: CREATION EXPERIENCE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

The experience of creating a master's degree program in Physics and Mathematics Education and Information Technology at Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI is presented. The prerequisites for the opening of the program, its goals, features and structure are considered. The mechanisms of interaction with leading pedagogical universities and employers in the development and implementation of the program are shown. The prospects for the development of pedagogical education on the basis of engineering and technical universities are analyzed.

Одной из приоритетных задач модернизации российского образования является подготовка высококвалифицированных педагогических кадров. Особенно остро ощущается нехватка учителей физики, математики и информатики, владеющих современными образовательными технологиями и методиками. Одним из перспективных решений этой проблемы может стать реализация педагогических программ на базе инженерно-технических вузов.

Снежинский физико-технический институт (СФТИ) НИЯУ МИФИ, имея многолетний опыт профориентационной работы и тесного взаимодействия со школами города в области преподавания физики, математики и информатики, а также располагая современной лабораторной и исследовательской базой и высококвалифицированными кадрами, предпринял важный шаг в решении проблемы нехватки учителей. В 2024 году в СФТИ была открыта магистерская программа «Физико-математическое образование и информационные технологии» по направлению 44.04.01 Педагогическое образование. Цель программы – подготовка педагогов, способных эффективно решать задачи в области физико-математического образования на основе фундаментальных знаний и сформированных компетенций, отвечающих требованиям профессиональных стандартов и запросам рынка труда. Особенностями программы являются: учет требований работодателей (предприятий Росатома, школ); сочетание педагогических дисциплин с профильными курсами физико-математической и ИТ-направленности; практико-ориентированность (педагогические практики в школах, разработка и апробация образовательных проектов).

Программа разработана в соответствии с актуальным ФГОС ВО [1]. Дисциплины программы условно можно разделить на два блока: общепедагогические (современные проблемы образования, методология научных исследований, инновации в образовании, педагогическое проектирование и др.); профильные, формирующие специальные компетенции (методика обучения физике и математике, подготовка к ГИА и олимпиадам, физический эксперимент, математическое моделирование, программирование, робототехника и др.). Важное место отводится учебным и производственным практикам, в ходе которых студенты приобретают опыт педагогической и проектной деятельности. При разработке и реализации программы СФТИ НИЯУ МИФИ опирается на опыт ведущих педагогических вузов РФ, учитывает лучшие практики педагогического образования. Кадровый состав программы составляют как штатные преподаватели с соответствующим инженерным и педагогическим образованием, так и внешние совместители, обладающие значительным опытом и компетенциями в реализации дисциплин педагогической направленности.

Для привлечения лучших абитуриентов и поддержки студентов предусмотрен комплекс мер социальной и материальной поддержки, содействие в трудоустройстве, возможность участия в мероприятиях ведущих образовательных проектов («Школа Росатома», «Сириус.Лето: начни свой проект» и др.).

Открытие педагогической магистратуры в СФТИ НИЯУ МИФИ – первый шаг на пути создания системы подготовки учителей на базе инженерно-технических вузов. В дальнейшем планируется отработка и тиражирование модели в других филиалах МИФИ и вузах городов присутствия Росатома. Этот подход открывает новые перспективы для повышения престижа профессии учителя и качества физико-математического образования, позволит обеспечить атомную отрасль высококвалифицированными кадрами.

Список литературы

1. https://www.fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Mag/440401_%D0%9C_3_17062021.pdf

В.И. ПЕТРОВ, А.М. ВИЛЯНСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЭЛЕКТИВ ДЛЯ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ

Подготовлена элективная дисциплина «Химизм физического эксперимента», с опорой на приобретённые студентом элементы химического мышления. Рассматриваются углублённо вопросы реакционной способности веществ, основы прогнозирования и контроля значимых химических факторов. Будущему инженеру-исследователю это важно в случае прецизионных физических измерений большой продолжительности, при повышенной температуре и в других специфических условиях. В практикуме предусмотрено знакомство с методами современной спектроскопии, например ICP, с приготовлением надёжных образцов и оборудования.

V.I. PETROV, A.M. VILYANSKIY
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ELECTIVE COURSE FOR FUTURE RESEARCHERS

An elective discipline, "Chemistry of a Physical Experiment", has been prepared, based on the elements of chemical thinking already acquired by the student. The issues of the reactivity of substances, the principles of forecasting and controlling significant chemical factors are considered in depth. For a future research engineer, it is important in the case of long-term precision physical measurements, at elevated temperatures and in other specific conditions. Practical familiarization with the methods of modern spectroscopy, such as ICP, with the preparation of reliable samples and equipment.

Пытливый студент, движимый современными «ускоряющими» идеями, нередко увлекается исследованиями уже на младших курсах, ещё не приобретя необходимые знания и навыки. Но вуз вводит в большую физику постепенно, последовательно, начиная с механики и термодинамики. В этой связи нам представляется полезным предложить студенту, готовясь к выбранной специализации, начать с освоения общенаучных принципов проведения эксперимента. В частности, обращаем внимание на химическое обеспечение. Это особенно важно в случае прецизионных измерений большой продолжительности, при повышенной температуре и в других специфических условиях. В новом курсе «Химизм физического эксперимента», предлагаемом на младших курсах в дополнение к дисциплине «Общая химия», рассматриваются вопросы современного химического обеспечения реального физического эксперимента. Многие прецизионные эксперименты, например, по уточнению фундаментальных физических констант, проводились с учётом возможного химического взаимодействия и с максимальным снижением его значимости в рабочем интервале термодинамических параметров, агрегатных состояний, реакционной способности, сорбции, электрохимических факторов и других условий. Влияние может быть заметным как в обычных условиях (например, при большой продолжительности эксперимента), так и в экстремальных: в космосе, ядерных реакторах, энерго-напряжённых устройствах, сверхтонких плёнках и порошках, пересыщенных растворах, в аварийных ситуациях. Полагаем курс актуальным для будущих исследователей.

Изложены критерии химической чистоты, влияющей на надежность и погрешность эксперимента. Приведены основы их прогнозирования и контроля. Отмечено, что часто наблюдается совместное влияние химических и физических факторов. Ряд закономерностей, освоенных физиками, первоначально был установлен для химических процессов: равновесие электронов и дырок в полупроводниках; ядерный распад как реакция первого порядка; особенности свойств, вносимые малыми примесями, необычной валентностью, водородными и донорно-акцепторными связями; нано-эффекты и т. п.

В практикуме предусмотрено знакомство с рядом полезных методик. Например, проведена лабораторная работа по определению примеси железа в марганце методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индукционно-связанной плазмой на спектрометре «Profile Plus». Уделяется внимание приготовлению надёжных образцов и оборудования, поддержанию оптимальных условий проведения эксперимента. Многогранность спектроскопии заслуживает особого внимания будущих исследователей как метод элементного и молекулярного анализа, инструмент для слежения за ходом и результатом эксперимента, постоянно расширяющий свои возможности за счёт введения всё новых физических аналитических сигналов и рабочих химических веществ.

В порядке педагогического эксперимента курс был проведен в течение первого семестра текущего учебного года (24 ч, 1 зачётная единица). Из 40 студентов, которым он был предложен как элективный, после первоначального знакомства с аннотацией остались 11 человек. Эти студенты прослушали лекции, изучили конспекты, презентации и электронные источники, присутствовали на практических занятиях, прошли все контрольные точки и получили зачёт. Оценки от «А» до «Е». В конце обучения представили рефераты либо сделали доклады на различные темы. Например, студенты-будущие ядерщики, а также специализирующиеся на «термояде» и лазерных технологиях, выбрали лазерную абляцию и спектральный анализ наночастиц, квантовые точки, новые изотопы, химические разработки электроизоляторов; материаловеды и «медики» - астроспектроскопию, хемосорбцию и коррозию. Несколько работ рекомендуем на студенческие конференции. Таковы предварительные итоги внедрения учебной дисциплины на стыке наук.

А.П. ПЛЁНКИН, В.В. ЮШИЦЫНА, И.А. СУРМЕНЕВА, А.В. ЗЫКОВА

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

pljonkin@sfedu.ru

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Описан механизм организации проектной деятельности в университете на примере реализации междисциплинарных проектов студентов. Представлены практики активностей по технологическому предпринимательству и инженерной деятельности. Предложена модель цифрового двойника, представляющая собой датасет с интегрированным чат-ботом и применением искусственного интеллекта для взаимодействия с пользователем. На примере проектной деятельности показано, что цифровой двойник повышает эффективность коммуникации между пользователем и цифровой личностью.

A.P. PLJONKIN, V.V. YUSHITSYNA, I.A. SURMENEVA, A.V. ZYKOVA
Southern federal university, Taganrog, Russia

DIGITAL TWINS AS AN EFFECTIVE TOOL FOR PROJECT ACTIVITIES

The mechanism for organizing project activities at the university is described using the example of implementing interdisciplinary student projects. Practices of activities on technological entrepreneurship and engineering activities are presented. Examples of international interdisciplinary projects implemented by students in different programs and levels of training are given. Events aimed at developing project activities at the university are described. A digital twin model is proposed, which is a dataset with an integrated chatbot and the use of artificial intelligence to interact with the user. Using the example of project activities, it is shown that the digital twin increases the efficiency of communication between the user and the digital personality.

Механизм управления проектной деятельностью в университете испытывает дефицит инструментов тайм-менеджмента. Как следствие, задействованные в организационном процессе кадры зачастую не имеют возможности эффективно распределить задачи. Основными стейкхолдерами в проектном обучении выступают: университет в лице преподавателей-наставников, обучающийся и партнёр [1–3]. При декомпозиции структура трансформируется и выделяются уточняющие роли: обучающийся, команда, управленец (капитан команды), наставник, ментор, технический специалист, тьютор, эксперт, организатор, координатор, партнёр, руководитель. Важнейшую роль при этом играют механизмы вовлечения обладателей ролей в проектную деятельность и коммуникация, которая должна быть высокоэффективной. Такие механизмы коммуникаций представляют особенную ценность и для каждой роли могут отличаться [4, 5]. Нами предложена модель цифрового двойника, которая реализована в виде чат-бота и основана на применении элементов искусственного интеллекта (нейронных сетей). На рисунке представлена схема взаимодействия цифрового двойника. Основными задачами такого инструмента являются: значительное сокращение временных затрат оригинальной личности и сбор его цифрового портфолио в единую базу данных.

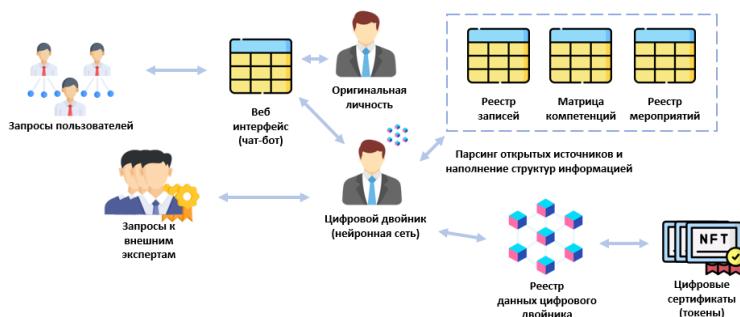


Рис. Схема работы цифрового двойника

Портфолио цифрового двойника собирается через парсинг ресурсов и вводится вручную через форму администратора. Особое внимание следует уделить составлению матрицы компетенций, которая соотносит данные с цифровыми сертификатами. Запросы пользователей поступают через веб-интерфейс и обрабатываются нейронной сетью. Обращение к пулу одобренных экспертов осуществляется цифровым двойником по мере обучения нейронной сети. Если смотреть на такой подход через призму образовательной программы, то можно представить обучение студента и работу преподавателя как совокупность эффективных методов и современных подходов к использованию технологий.

Список литературы

- Edward Guustaf, Untung Rahardja, Qurotul Aini, Herliana Wahyu Maharani, Nesti Anggraini Santoso. Blockchain-based Education Project. Aptisi Transactions on Management (ATM) (2021), 10.33050/atm.v5i1.1433.
- Плёнкин, А. П. Организация проектной деятельности / А. П. Пленкин, М. Г. Шулика, В. Д. Михайлова. – Ростов-на-Дону, Таганрог : Южный федеральный университет, 2024. – 167 с. – ISBN 978-5-9275-4524-7.
- Marina Borovskaya, Gennady Veselov, Maksim Bondarev, and Anton Pavlovich Pljontkin. Building Students' Digital Footprints with Blockchain in PBL Activities. In Proceedings of the 2023 5th Blockchain and Internet of Things Conference. 2023. P. 63–70. <https://doi.org/10.1145/3625078.3625087>.

В.Ю. САВИН, П.Н. РЯБОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБ ОПЫТЕ ОРГАНИЗАЦИИ СТУДЕНЧЕСКОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИГИ НИЯУ МИФИ

Описываются подходы к организации студенческих математических движений на примере объединения НИЯУ МИФИ Математическая Лига. Представляется опыт работы объединения, варианты распространения формата на иные высшие и средние учебные заведения России.

V.Y. SAVIN, P.N. RYABOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ON THE EXPERIENCE OF ORGANIZING STUDENT MATHEMATICAL MOVEMENT ON THE EXAMPLE OF THE MATH LEAGUE OF NRNU MEPhI

The article describes approaches to organizing student mathematical movements using the example of the association of the National Research Nuclear University MEPhI Math League. The article presents the experience of the association and options for extending the format to other higher and secondary educational institutions in Russia.

Потребность в специалистах высокого уровня в области исследований, связанных с хорошей математической подготовкой, как в России, так и за рубежом признается работодателями абсолютно неудовлетворенной. Так, в соответствии с Бюро статистики труда США, в период с 2018 по 2028 год ожидается, что рынок труда для математиков вырастет на 30 процентов. Примерно такая же тенденция ожидается в странах Западной Европы.

В Распоряжении Правительства РФ от 31.12.2020 по математическим наукам выявлено 8 направлений фундаментальных научных исследований, среди которых теоретическая и вычислительная математика, искусственный интеллект, высокопроизводительные вычисления и другие. Это число сопоставимо с соответствующими числами для физических и химических наук. В соответствии с этими и подобными причинами в октябре 2021 года в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» зародился проект «Математическая Лига».

«Математическая Лига» НИЯУ МИФИ представляет собой добровольное объединение сотрудников и обучающихся НИЯУ МИФИ, занимающихся организацией и проведением мероприятий, направленных на дополнительную математическую подготовку студентов и абитуриентов НИЯУ МИФИ и обособленных структурных подразделений НИЯУ МИФИ, а также популяризацию математического образования.

Ключевой элемент объединения (цель) – создание пространства для развития математических способностей ребят через организацию математических мероприятий и взаимодействие с партнерами.

Среди задач «Математической Лиги» можно выделить:

- повышение числа участников, призеров и победителей математических соревнований и олимпиад из числа учащихся НИЯУ МИФИ и филиалов НИЯУ МИФИ;
- вовлечение обучающихся в активную научную и научно-просветительскую деятельность в области математики через организацию студенческих математических кружков, конференций, олимпиад и кейс-лабораторий;
- развитие сотрудничества с исследовательскими институтами, математическими объединениями других вузов и общеобразовательных учреждений с целью повышения качества подготовки студентов по математике;
- формирование и развитие студенческой информационной среды в НИЯУ МИФИ с целью оповещения обучающихся о деятельности «Математической Лиги» и других математических объединений, а также популяризации математики среди студентов.

Одним из ключевых факторов развития объединения стало создание собственной айдентики, логотипа, мерча и даже девиза. Всё это позволяет отделять, идентифицировать Лигу от подобных проектов в информационном поле и продвигать ее среди студентов и школьников по всей России.

Таким образом, за 3 года существования проекта «Математическая Лига» была развита концепция и реализованы основные задачи объединения, а именно создание пространства для развития математических способностей студентов НИЯУ МИФИ и филиалов через организацию математических мероприятий, разработку системы подготовки и участия во внешних математических соревнованиях, а также создание и продвижение бренда объединения.

Открытая форма реализации проекта и универсальность интереса (математический профиль) позволяют достаточно легко транслировать опыт работы объединения на иные высшие и средние учебные заведения, расширять географию и максимально привлекать к занятия математикой ребят по всей России.

Список литературы

1. Генкин С.А., Итенберг И.В., Фомин Д.В. Ленинградские математические кружки: пособие для внеклассной работы. – Киров.: Издво «АСА», 1994.– 272с.

Т.О. САНЧАА

Новосибирский государственный педагогический университет, Новосибирск, Россия

ПРЕДВУЗОВСКАЯ ПОДГОТОВКА БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ НА УРОВНЕ СРЕДНЕГО ОБЩЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Рассмотрена Образовательная технология подготовки будущих инженеров на уровне среднего общего образования в профильных классах, обеспечивающая возможность поступления выпускников школ в технические вузы. На занятиях базового образования учащиеся имеют возможность изучать «Основы цифровой электроники», приобретать умения моделирования физических процессов на современных языках программирования, конструирования приборов и устройств используя новые электронные компоненты.

T.O. SANCHAA

Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia

PRE-UNIVERSITY TRAINING OF FUTURE ENGINEERS AT THE LEVEL OF SECONDARY GENERAL EDUCATION

The Educational technology of training future engineers at the level of secondary general education in specialized classes, which provides the opportunity for school graduates to enter technical universities, is considered. In basic education classes, students have the opportunity to study the "Fundamentals of Digital Electronics", acquire the skills of modeling physical processes in modern programming languages, designing devices and devices using new electronic components.

Современное технологическое развитие отраслей экономики нашей страны требует новый подход при подготовке учащихся среднего общего образования для поступления в технические вузы. Автором разработана Образовательная технология, соответствующая новым требованиям и содержания «Федеральной рабочей программы среднего общего образования» по учебному предмету Физика на углублённом уровне, апробирована и получены положительные результаты – высокое качество образования в рамках профильного образования, 100% поступление выпускников в самые престижные технические вузы Российской Федерации. Реализация Образовательной технологии осуществляется на протяжении 33 лет в ГАНОО «Государственный лицей Республики Тыва» (ГЛРТ), созданном автором в 1991 году как профильная школа для интеллектуально одарённых учащихся.

Образовательная технология описана [1] и состоит из: Концептуальной, Содержательной и Процессуальной частей. Первая часть содержит Нормативно-правовые акты, вторая часть – Учебную программу, Календарно-тематическое планирование, третья часть – описание форм проведения учебных занятий, перечень учебного оборудования, программы Воспитания качеств Исследователя и Лидера.

Учебная программа по учебному предмету Физика спроектирована по принципу устройства ядра науки и применения его для изучения, исследования и конструирования новых цифровых приборов и устройств. Учебная программа состоит из двух частей: Теоретический аппарат и Физические объекты и явления. Так устроены программы по всем разделам Физики, изучаемых в 10-11 классах. Разделы сгруппированы следующим образом: Физика I, содержит разделы Механика, Молекулярная физика и Квантовая физика; Физика II, содержит раздел Электродинамика, Физика III - Техническая физика, которые ведутся параллельными курсами в рамках учебного предмета Физика, на прохождение которого отводится 5 часов в неделю. Такое проектирование учебной программы по Физике неумолимо повлекло за собой аналогичный подход к проектированию учебных программ и согласованию её с программами по учебным предметам Математика и Информатика [2]. В продолжении методической работы такой подход к проектированию учебных программ был осуществлен по всем учебным предметам среднего образования.

На лекционно-практических занятиях, для усвоения учащимися Теоретического аппарата Физики применяется нетрадиционный приём. Педагог с помощью презентации представляет ядро теории в состав которого входят: Модели, Физические характеристики объектов и явлений, Общие законы, а учащиеся пользуясь учебным пособием «Дописи» заполняют его и усваивают «знания» в течении нескольких занятий. Затем, на семинарских занятиях учащиеся решают теоретические и экспериментальные задачи, изучая материальные объекты и их применение в технических устройствах, выступают с докладами по теме семинара. На практических занятиях, которые проводятся при изучении курса Техническая физика, все учащиеся занимаются индивидуальными проектами конструирования цифровых приборов и устройств, на созданных каждому ученику «Рабочем месте» в Школьной научной физической лаборатории при кабинете Физики. Эти работы, учащиеся представляют на, разного уровня научно-практических конференциях, например, таких как «Шаг в будущее», «Шаги в науку», «Юность. Наука. Культура».

По количеству наград на конференциях, участию во Всероссийской олимпиаде, поступлению всех выпускников всех выпусков ГЛРТ в вузы на технические специальности, а также по тому что лицей неоднократно входил в топ 10, 50 Лучших школ РФ по версии престижных вузов РФ, можно констатировать, что Образовательная технология результативна, пригодна для воспроизведения, распространения и обучения ей будущих учителей физики.

Список литературы

1. Санчaa Т.О. Инновации в обучении интеллектуально одарённых учащихся. Кейс учителя Физики. Кызыл: Издательство ГБНУ Министерства образования и науки РТ «Институт развития национальной школы», 2020. 205 с.
2. Санчaa, Т. О. Реализация междисциплинарного подхода в предвузовской подготовке учащихся по физике / Т. О. Санчaa, Т. В. Никитина // Мир науки, культуры, образования. – 2024. – № 4(107). – С. 292-294.

И.В. АРХАНГЕЛЬСКАЯ, А.В. ВИНОГРАДСКАЯ, И.Д. ЗАРИПОВ, А.И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, Е.А. РУДАКОВА, А.И. МАДЖИДОВ, Е.Н. ЧАСОВИКОВ, М.О. ПАНЬКОВА, В.В. МИНАСЯН, Е.И. ПЛОТНИКОВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ В НИЯУ МИФИ

В работе обсуждается возможность использования параболических сетчатых оффсетных антенн AX-Offset D90 для создания уникальной научной установки "Радиоинтерферометр МИФИст". При ее разработке и создании, а также, в дальнейшем, при обработке поступающих данных, студенты получат огромный практический опыт, который они смогут использовать в проектной деятельности, преддипломной практике и при подготовке выпускных квалификационных работ.

I.V. ARKHANGELSKAJA, A.V. VINOGRADSKAYA, I.D. ZARIPOV, A.I. ARKHANGELSKIY, E.A. RUDAKOVA, A.I. MAJIDOV, E.N. CHASOVIKOV, M.O. PANKOVA, V.V. MINASYAN, E.I. PLOTNIKOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

USING RADIOINTERFEROMETRY TECHNIQUE IN THE EDUCATIONAL PROCESS AT NRNU MEPhI

The possibility of the parabolic offset antennas AX-Offset D90 using to create a unique scientific complex "Radio Interferometer MEPhIst" is discussed. During its development, as well as, during the database treatment, students will gain extensive practical experience will be able to use in project activities, pre-graduation practice and in the preparation of final qualifying works.

Радиоинтерферометрия – метод, основанный на приёме космического радиоизлучения несколькими далеко разнесёнными антеннами и интерференции принятых сигналов, его развитие для диагностики космофизических явлений стало чрезвычайно актуальным в последнее время [1, 2]. В работе обсуждается использование параболических сетчатых оффсетных антенн AX-Offset D90 для создания уникальной научной установки "Радиоинтерферометр МИФИст". Ранее в студенческом проекте [3] была разработана модель антенного модуля на основе AX-Offset D90, отличающегося компактными размерами и доступностью деталей. Предполагается использование 46 и 30 основных антенных модулей при монтаже радиоинтерферометра на крыше корпусов НЛК и К НИЯУ МИФИ соответственно. Фотографии процесса сборки макета антенного модуля студентами, собранной антенны и примерная схема монтажа установки показаны на рис.1. Научные задачи радиоинтерферометра МИФИст будут включать в себя изучение солнечного радиоизлучения в диапазоне от 0.95 (31.5 см) до 1.75 ГГц (17.13 см), что даст возможность продолжить идентификацию механизмов ускорения электронов, вспышечного нагрева плазмы и процессов переноса энергии, а также обнаружение и исследование ударных волн и эволюции крупномасштабных структур в солнечной атмосфере; и развитие методов индексирования и мониторинга солнечной активности по характеристикам радиоизлучения. Кроме того, эта установка может быть использована для изучения излучения в линии водорода H I 1420,40575 МГц при различных красных смещениях и анализа радиоизлучения ШАЛ. Обсуждается создание интерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) совместно с Многоволновым радиогелиографом НГЦ РАН (ИСЗФ СО РАН) [2], что позволит изучать радиопрозрачность элементов грануляции в атмосфере Солнца. Полученные данные будут публиковаться в ведущих базах: Visier, NED и т.д. При разработке и создании этой установки, а также при обработке поступающих данных, студенты получат огромный практический опыт для использования в проектной деятельности, преддипломной практике, а также при подготовке выпускных квалификационных работ.

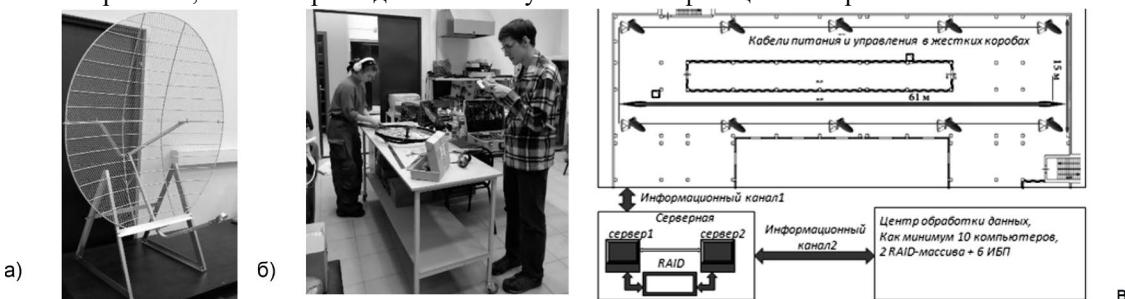


Рис. 1. Фотографии собранной антенны макета (а), процесса сборки макета антенного модуля студентами в рамках проектной практики (б) и примерная схема монтажа радиоинтерферометра МИФИст на крыше корпуса НЛК (в).

Список литературы

1. Васильев М.В., Зимовский В.Ф., Мельников А.Е. и др // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 6, С. 111-124.
2. Алтынцев А. Т., Лесовой С.В. Глоба М.В. и др // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. №. 2. С. 37-50.
3. Виноградская А. В., Воскобойников Д. О., Зарипов И. Д. и др // Сборник избранных тезисов работ лауреатов III Зимней научной сессии СНО НИЯУ МИФИ. 2023. С.13-14

А.В. ПАРУСНИКОВА
Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ БОИ МИЭМ

Приводится краткий анализ и описание проведенных автором и командой устной командной студенческой олимпиады “Математические бои МИЭМ” на базе Московского института электроники и математики НИУ ВШЭ.

A.V. PARUSNIKOVA
HSE University, Moscow, Russia

MATHEMATICAL BATTLES IN MIEM

A brief analysis and description of the team Olympiad “Mathematical Battles in MIEM” for students conducted by the author and the professional organizing team at the Moscow Institute of Electronics and Mathematics of the HSE University is provided.

Автор работы и сформировавшаяся профессиональная команда организаторов провели и подготовили пять студенческих олимпиад “Математические бои МИЭМ”: в 2018-2020 годах, затем в 2023 и 2024 годах.

Математические бои – это традиционная устная олимпиада, которая проводится в соответствии с классическими правилами, которые можно найти на сайте [1]. Соревнование проходит так: команды под предводительством капитанов получают задания (обычно у нас по 8 задач), решают их, не советуясь с другими командами. Затем все команды разбиваются на пары, и для каждой пары команд проходит бой. В ходе каждого раунда боя участники команд либо рассказывают задачу (выступают в качестве докладчика), либо оппонируют рассказываемое решение, находя в нем ошибки или соглашаясь с ним. Участником каждого боя является жюри, которое, в частности, распределяет баллы за каждую задачу между докладчиком, оппонентом и самим жюри: суммарно 12 баллов. Итоговый результат боя зависит от того, будет ли команда рассказывать решение конкретной задачи или оппонировать, в каком порядке будут вызвана команда-противник на какую задачу, примет ли команда вызов, кто будет оппонировать решение и рассказывать (есть ограничение на количество выходов каждого участника команды к доске), в какой момент команда возьмет полуминутный перерыв, от решений капитана в ключевые моменты боя.

Команды-участники наших олимпиад обычно состоят из 4-6 человек. Заранее проводится регистрация команд, при этом допускается регистрация участников без команды, для них всегда находили возможность присоединиться к малочисленным командам или объединиться в новую команду.

В первой олимпиаде участвовало 6 команд, все они состояли из студентов первого и второго курса разных образовательных программ бакалавриата и специалитета МИЭМ НИУ ВШЭ, при этом деления на команды первого и второго курса не проводилось. Во второй раз состав участников был расширен: помимо студентов образовательных программ “Прикладная математика”, “Компьютерная безопасность”, “Информатика и вычислительная техника”, “Информационные технологии и системы связи” МИЭМ НИУ ВШЭ, появились участники с Факультета компьютерных наук НИУ ВШЭ, а также команда кампуса НИУ ВШЭ из Нижнего Новгорода. На третью олимпиаду также приехали студенты других вузов, например, студенты МФТИ, а также механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, а в следующих математических боях участвовали студенты МИФИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и МИСИС. Пятая проведенная олимпиада приняла 16 команд, в составе которых был 51 студент первого курса и 33 второкурсника.

Начиная со вторых Математических боев МИЭМ, проводятся отдельные соревнования для первокурсников и второкурсников. Задачи для олимпиады подбираются, адаптируются и придумываются, исходя из того, что они должны быть доступны для решения студентами образовательной программы “Прикладная математика” МИЭМ НИУ ВШЭ, а также не обгонять пройденную на момент проведения часть программы по большинству общих дисциплин участвующих вузов. Задачи предлагаются по следующим темам и предметам: математический анализ, линейная алгебра, комбинаторика, алгебра, теория графов, теория чисел, геометрия, функциональный анализ, дифференциальные уравнения, теория функций комплексного переменного, теория вероятностей, криптография.

Собрана прекрасная профессиональная, опытная, постепенно меняющаяся команда организаторов. Некоторые члены жюри участвовали в проведении всех пяти прошедших олимпиад, есть те, кто начинал в качестве участников, а потом стал преподавать. В качестве судей (жюри) также выступают преподаватели вузов-участников, НИУ ВШЭ, математических школ, и люди, сами участвовавшие в подобных олимпиадах.

Преимуществами именно такого формата олимпиады – командной и устной – являются возможность совместного решения задач участниками команды (что особенно важно при наличии элементов рейтингового оценивания студентов), обсуждения вариантов подхода к задаче, выход за рамки стандартных задач программы, оформление решения в пригодной для устного изложения форме, анализ и поиск ошибок в чужих решениях, знакомство с участниками из других вузов.

Список литературы

1. <https://olympiads.mccme.ru/matboi/pravmafb.htm>

Е.О. САВЕЛЬЕВА, И.Л. САВЕЛЬЕВ
Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ИНЖЕНЕРНЫХ VR И AR ПРОЕКТОВ СТУДЕНЧЕСКИМИ КОМАНДАМИ

В работе рассматриваются ключевые этапы разработки инженерных VR и AR проектов: планирование, формирование команды, подбор ПО и создание контента. Особое внимание уделяется подходам для оптимизации процесса разработки, таким как использование готовых библиотек, фотограмметрии и нейросетей.

E.O. SAVELEVA, I.L. SAVELEV
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF ENGINEERING AR AND VR PROJECTS BY STUDENT TEAMS

The paper discusses the key stages of the engineering VR and ar project planning, team building selection and content creation special attention is given to approaches for optimization of the development process such as the use of ready-made libraries for photogrammetry and neural networks.

В последние годы технологии виртуальной (VR) и дополненной (AR) реальности произвели революцию в различных областях, включая инженерное дело и образование [1-2]. Студенческие команды активно внедряют эти инновационные технологии в свои проекты, открывая новые горизонты для обучения и исследований.

Разработка инженерных VR и AR проектов студенческими командами в рамках проектной деятельности сопряжена с рядом трудностей: различный уровень подготовки учащихся, профили образования участников команды, отсутствие специализированных навыков и оборудования, ограниченность во времени на разработку контента для проекта, недостаточное качество разрабатываемого контента, и многое другое.

В работе кратко представлены подходы позволяющие оптимизировать процесс создания инженерных VR и AR проектов студенческими командами.

Для успешного воплощения проекта первым этапом должно быть планирование: необходимо максимально точно и подробно расписать основные цели и этапы проекта, выделить ключевые точки, разработать диаграмму Ганта с укрупнёнными задачами и сроками выполнения. Далее следует формирование команды. Необходимо провести детальный опрос: какая основная специальность, есть ли доступ к ПК, его характеристики ПК, выявить наличие навыков работы с ПО (это могут быть как различные САПР (AutoCAD, Компас, NanoCAD и т.д.), так и ПО для полигонального моделирования (Blender, 3ds Max, Cinema 4D и т.д.)).

Следующим немаловажным этапом становится подбор ПО, в котором будет работать команда. На данном этапе крайне важна работа, проделанная ранее. Разграничив задачи (разработчики 3D моделей, кода для работы в VR пространстве, стилистики интерфейса и т.д.) можно сделать осознанный выбор не только о выборе самого ПО, но и выявить о необходимость обучения членов студенческой команды работы с необходимым ПО.

Далее переходим к основной части разработки проекта - создание контента (3D модели). Для успешной реализации проекта предлагается использование готовых библиотек, применение наиболее простого и доступного ПО, использование фотограмметрии, совмещённую работу САПР и ПО, применение нейросетей для создания текстур и рабочих референсов. Результаты одного из студенческих проектов представлены на рис. 1.

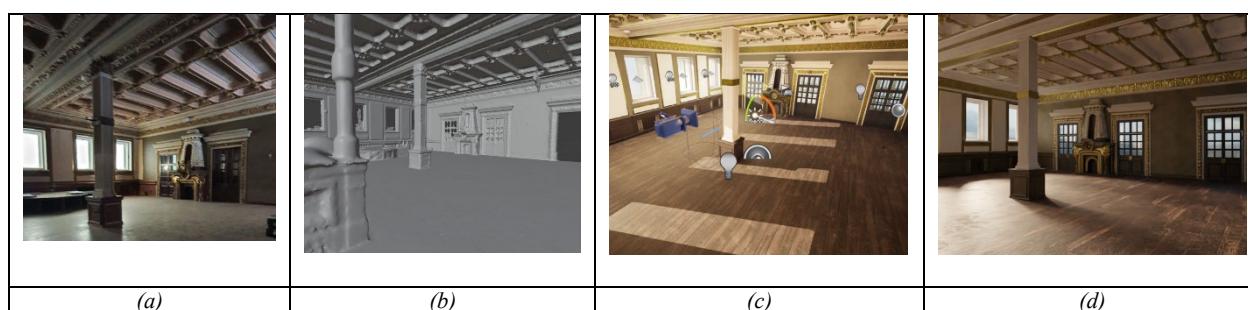


Рис. 1. Стадии работы над VR проектом: а – фото объекта; б – машинный перевод облака точек в модель, в – текстурирование и настройка с вета в UE5, д – результат работы

Список литературы

1. Zhang, N., Luo, G., Li, Y., Zhang, J., Yang, X. (2021). Virtual Reality Interaction and Security Control System Framework Based on Digital Twin. In: Xu, Z., Parizi, R.M., Loyola-González, O., Zhang, X. (eds) Cyber Security Intelligence and Analytics. CSIA 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1343. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69999-4_119
2. Иванов А.В. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018; (3):88-107. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-3-88-107

В.В. ВАЙТОНИС, Я.С. ЛЯХОВА
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБЗОР ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЕКТА «ЛАПЛАЗИАН»

Доклад представляет собой обзор деятельности аутентичного образовательного проекта «Лаплазиан», действующего на базе института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ. От выявления слабого места традиционной образовательной траектории студентов вуза — потери мотивации к научной работе в процессе обучения в вузе — мы переходим к рассмотрению комплексного решения этой проблемы, реализуемого нами в рамках проекта «Лаплазиан». В докладе будут представлены образовательные и наставнические практики проекта. Эффективность предлагаемых нами методов работы со студентами подтверждается достижениями участников «Лаплазиана», признанными широким научным сообществом.

V.V. VAITONIS, Ya.S. LYAKHOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

REVIEW OF THE EDUCATIONAL PROJECT "LAPLASIAN"

Here we present a review of activity of authentic educational project «Laplasian», which is acting on the base of LaPlas institute of NRNU MEPhI. We start with the revealing of weaknesses of ordinary educational system, namely the loss of motivation to do science throughout higher school education. Next we consider the complex solution of this problem provided by the «Laplasian» project. In this report we present both educational and mentoring practices of the project. We confirm the effectiveness of these methods by presenting the achievements of the «Laplasian» students, recognized by a wide scientific community.

Среди студентов младших курсов немало молодых людей, которые пришли в университет с мечтами о новых научных горизонтах, открытии новых законов, спасении человечества. Отсутствие представления о реальной учебной нагрузке в университете и, соответственно, готовности к интенсивной работе, а также ясного понимания, зачем всё это надо изучать, достаточно быстро разрушало в этих людях мотивацию к учебе. Уже к концу первого курса многие из них меняли представление «о, какие интересные предметы!» на «лишь бы сдать», а к концу третьего курса превращались в «уставших от жизни» студентов, которых уже сложно было чем-то новым удивить или заинтересовать. Лишь на последнем курсе, когда студенты оказывались в научных коллективах и с реальными задачами, снова появлялась мотивация к обучению.

В докладе представлена программа проекта «Лаплазиан» и идеи, заложенные в этот проект. На входе студенты проходят отбор в несколько этапов: эссе, успеваемость, собеседование. Первый семестр посвящен знакомству с областью научной деятельности института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ. Второй семестр: проба взаимодействия с научным руководителем в выбранном направлении и начало работы над подготовкой и представлением доклада в научно-популярном стиле. Третий семестр: работа над структурой выступления и соответствия критериям научного доклада. Выступление проходит на английском языке. Параллельно выполняется небольшая научная или инженерная задача, требующая навыка работы в команде и слежения за сроками. Четвертый – итоговый – семестр: каждый студент выступает с текущими результатами научной деятельности (на русском языке) в конференционном формате. Это выступление рассматривается как подготовка к выступлению на отчетной конференции «Лаборатория», которая является для участников финалом в проекте в качестве обучающегося. Основной целью проекта является сохранение мотивации к познанию, к научно-исследовательской деятельности, с которой студенты поступают в университет, а также помочь в совершении первых шагов научной карьеры. В качестве подтверждения эффективности методики проекта приводятся результаты участников, признанные широким научным сообществом.

Л.Д. АЛАЕВА, А.Д. БАКУН
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РОЛЬ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКТОРОВ В STEM-ОБРАЗОВАНИИ И ОБУЧЕНИИ ФИЗИКЕ В ШКОЛАХ

В работе было рассмотрено, как инженерные конструкторы влияют на повышения качества STEM-уроков при изучении физике в школах, способствуя развитию практических и теоретических навыков у учащихся [1]. Демонстрируется применение масштабных конструкторов, таких как БИГО [2], которые позволяют усилить демонстрационный эффект от эксперимента и повысить мотивацию обучающихся к развитию в технической сфере. Показаны примеры моделей для проведения физических демонстраций на уроках в 7-9 классах по темам «Статика», «Золотое правило механики». Разобрана методика применения масштабных конструкторов на уроках физики в средней школе и на профориентационных мероприятиях.

L.D. ALAEVA, A.D. BAKUN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE ROLE OF ENGINEERING KITS IN STEM EDUCATION AND PHYSICS TEACHING IN SCHOOLS

The paper examines how engineering kits can influence the improvement of STEM lessons in physics/science in schools, contributing to the development of both practical and theoretical skills in students [1]. It demonstrates the use of large-scale engineering kits, such as BIGO [2], which enhance the demonstration effect of experiments and increase students' motivation to pursue technical fields. Examples of models for conducting physical demonstrations in 7th-9th grade lessons on the topics "Statics" and "The Golden Rule of Mechanics" are presented. The methodology for using large-scale sets in high school physics lessons and career orientation events is discussed.

В работе были рассмотрены теоретические основы и значимость применения инженерных конструкторов в образовательном процессе при использовании STEM подхода в обучении. Показаны примеры уроков и соревнований, использующихся в средней и старшей школе на уроках естествознания, физики, технологии. Проведён анализ результатов применения конструкторов в образовательном процессе. На основе масштабного конструктора производства ООО «БИГОЛЭНД» были созданы методические материалы для учебных занятий: план проведения урока, методические материалы для учителя, задания для школьников.

Базовый конструктор рассчитан в первую очередь для применения на уроках технологии, поэтому для использования его на уроках физики были разработаны дополнительные соединительные элементы, 3D модели установок для демонстрации законов механики (золотое правило механики, правило рычага (рисунок 1), понятие момента силы и т.д.), подготовлены подробные инструкции по сборке этих установок для учителей и учеников. Все разработанные модели оптимизированы для изготовления в школьной лаборатории методом FDM печати с помощью PLA пластика. Для учащихся профильного уровня подготовлены сборочные чертежи для всего комплекта, оформленные в соответствии с ГОСТ 2.109-73 для знакомства с технической документацией проекта.

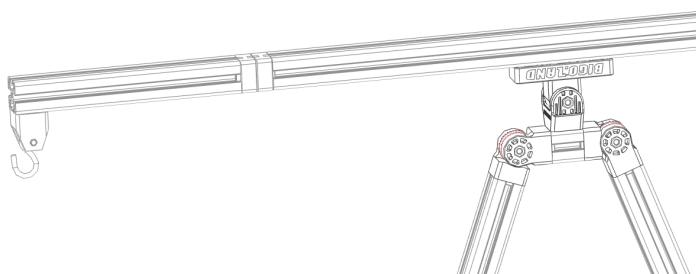


Рис. 1 3Д модель установки демонстрации законов механики

Работа показывает возможность использования образовательных конструкторов для работы в профильных классах инженерной направленности, а также возможности проектирования междисциплинарных занятий по физике и технологии с их помощью.

Список литературы

1. Zainal, N. F. A. (2018) “Primary and Secondary School Students Perspective on Kolb-based STEM Module and Robotic Prototype”, International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 8(4-2), pp. 1394–1401. doi: 10.18517/ijaseit.8.4-2.6794
2. Bigo [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bigo.land/>

К.В. КАН, П.Н. РЯБОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТНОГО ПОДХОДА В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ БАКАЛАВРИАТА НАПРАВЛЕНИЯ 01.03.02

Приводится описание особенностей проектного подхода в рамках обучения студентов бакалавриата по направлению 01.03.02 Прикладная математика и информатика.

K.V. KAN, P.N. RYABOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

FEATURES OF THE PROJECT APPROACH IN BACHELOR STUDENTS STUDYING OF 01.03.02 BACHELOR'S PROGRAMM

A description is given of the features of the project approach within the framework of training undergraduate students in the field of Applied Mathematics and Informatics 01.03.02.

Проектный подход в образовании на текущий момент является актуальным направлением в развитии формирования необходимых компетенций обучающихся как среднеобразовательных учреждений, так и вузов. В рамках аprobации данного подхода в рабочие учебные планы по направлению 01.03.02 на первые четыре семестра была добавлена новая дисциплина – «Проектная практика».

В течение первых трех лет реализация дисциплины выстраивалась по принципу научно-исследовательской работы. Для распределения на первом этапе студентам предлагалось описать, что их интересует в контексте науки. После закрепления студентов за руководителями на основе полученных пожеланий, обучающиеся начинали работу в командах по 1-3 человека. Целью каждого из проектов было дать возможность углубиться в интересующую тематику глубже, нежели по основной программе, под руководством опытного сотрудника и решить предложенную задачу. В конце каждого семестра студентов заслушивала комиссия и оценивала результаты проделанной работы.

Следует отметить, что в ходе реализации описанного варианта аprobации проектного подхода некоторые студенты уже с первого курса смогли строго определить направленность их научных интересов и завершили обучение на бакалавриате с выпускной работой в рамках этой тематики.

Однако, такой вариант реализации дисциплины имеет ряд недостатков таких, как

1. На первом курсе студенты только привыкают к новому формату обучения по сравнению со школьным и не могут сразу включиться в исследовательский процесс;
2. Не во всех случаях удавалось закрепить студентов с учетом их пожеланий ввиду отсутствия достаточного количества руководителей;
3. Сильная загруженность на первом курсе дисциплинами гуманитарного и общепрофессионального блоков, в связи с чем отношение студентов к курсу «Проектная практика» очень зависело от их успеваемости в целом.

В связи с этим было принято два решения: проводить курс только на 2-4 семестрах, а также выдавать задачи из одной области на все команды. Такой вариант аprobации подхода дает возможность студентам развивать внутренние коммуникации и решать предложенные задачи более планомерно в течение семестра. Такой способ показал более высокую вовлеченность студентов в процесс решения задач.

Важность проектного подхода в обучении играет большую роль, так как позволяет студентам развить навыки командной работы и базовые навыки проведения исследований, что в контексте наук прикладного характера является неотъемлемой составляющей.

Список литературы

1. Hall, A. and Miro, D., 2016. A study of student engagement in project-based learning across multiple approaches to STEM education programs. *School Science and Mathematics*, 116(6), pp.310-319.

Ю.В. МАСЛОВА, С.Н. ТОРГАЕВ, Д.Е. КАШИРСКИЙ

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

ОБРАЗОВАНИЕ В ОБЛАСТИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ: ВЫЗОВЫ, ОПЫТ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотрены основные направления развития образовательных программ в области квантовых технологий. Проведен анализ вызовов современного рынка труда и необходимости подготовки специалистов. Показана необходимость использования и описан интерфейс разработанного эмулятора квантового компьютера.

Yu.V. Maslova, S.N. Torgaev, D.E. Kashirskiy
National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

QUANTUM COMPUTING EDUCATION: CHALLENGES, EXPERIENCE, PROSPECTS

The main directions of development of educational programs in the field of quantum technologies are considered. An analysis of the challenges of the modern labor market and the need to train specialists was carried out. The necessity of using and describing the interface of the developed quantum computer emulator is shown.

Согласно концепции технологического развития Российской Федерации, предполагающей достижение технологического суверенитета и устойчивое развитие производственных систем, к концу третьего десятилетия XXI века страна должна иметь собственную научную, кадровую и технологическую базу в области критических и сквозных технологий. Для становления и развития высокотехнологичного производства требуется кадровый потенциал широкого спектра - ученые для создания новых технологий, инженеры для воплощения разработок в жизнь, менеджеры для продвижения инновационных идей и рабочие, обладающие знаниями и навыками.

Одной из таких областей являются квантовые технологии. Растущие возможности их практического применения определяет спрос на специалистов, способных выполнять техническое обслуживание инновационного коммуникационного оборудования, строить и эксплуатировать линии квантовой связи, разрабатывать и использовать квантовые алгоритмы.

Анализируя вызовы современного рынка труда, можно сделать вывод о необходимости подготовки кадров по данному направлению. Однако, запрос вакансий с конкретными «квантовыми» компетенциями на популярных кадровых ресурсах показывает крайне низкий результат, что говорит о неготовности кадрового поля к массовому труду устройству таких специалистов. Особенно ярко данная ситуация проявляется в области квантовых вычислений. Однако именно квантовые вычисления на сегодняшний день имеют наиболее обширное практическое применение. Разработка и эксперименты с реальными квантовыми устройствами являются сложными и затратными процессами, а их доступность ограничена. Таким образом, актуальной становится задача создания собственного эмулятора квантовых вычислений, который был бы доступен для исследователей из России и других стран. Это позволило бы расширить круг пользователей и стимулировало бы развитие квантовых технологий в стране.

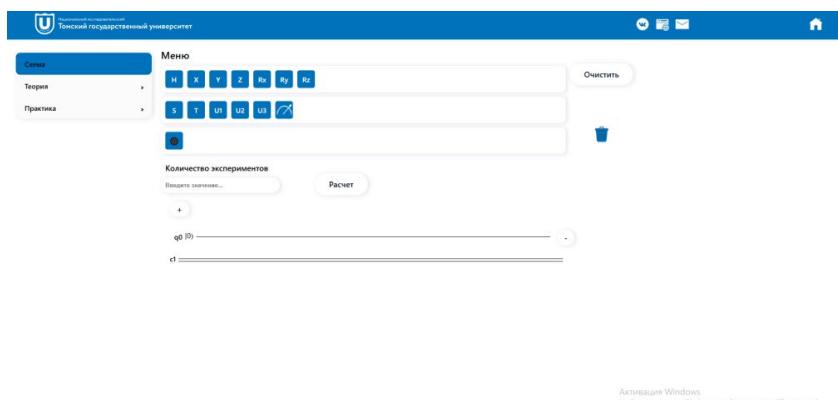


Рис. 1 Интерфейс эмулятора квантового компьютера

На сегодняшний день командой радиофизического факультета НИ ТГУ разработан прототип web-интерфейса, а также серверная часть на базе библиотеки Qiskit [1], позволяющий студентам получать необходимые компетенции в области построения и использования квантовых алгоритмов. Система имеет несколько теоретических и практических разделов и полностью адаптирована для использования в учебном процессе.

Список литературы

1. Qsim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://qsim.tsu.ru/>, (дата обращения: 20.01.2025)

П.Н. РЯБОВ, А.П. КУЗНЕЦОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛЬ STEM-ОБРАЗОВАНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ ПРОГРАММАХ ВУЗОВ

В работе предложена модель создания STEM-ориентированных образовательных программ для студентов инженерных направлений подготовки (математика, физика, инженерия) на базе проектного подхода. Рассматриваются особенности реализации данной модели на примере образовательных программ института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Обсуждаются ключевые аспекты реализации проектных дисциплин в рамках предложенной модели.

P.N. RYABOV, A.P. KUZNETSOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MODEL OF STEM EDUCATION IN UNIVERSITY ENGINEERING PROGRAMS

We present a model of STEM based organization of educational programs for engineering students. This model is based on the project based methodology. The features of the implementation of this model on the basis of traditional educational programs of the Institute for Laser and Plasma Technologies of the National Research Nuclear University MEPhI are considered. Key aspects of the implementation of design disciplines in the proposed model are discussed.

Сегодня в России наблюдается существенный спрос на квалифицированных инженеров, способных создавать новые технологии и обладающих необходимым технологическим стэком для бесшовной интеграции в производственные и высокотехнологические компании. Наблюдается рост требований к качеству подготовки выпускников инженерных направлений в вузе. Помимо этого, со стороны рынка к выпускнику выдвигается все больше требований по наличию компетенций, которые не относятся к его непосредственной профессиональной направленности (hard skills). Это, помимо прочего, рождает необходимость в трансформации образовательных программ, их актуализации в соответствии с запросом ключевых заказчиков инженерных кадров на рынке труда. По существу, появление таких федеральных проектов как Передовые инженерные школы призваны создать различные опережающие практики подготовки инженерных кадров в кооперации с высокотехнологичными компаниями.

Одной из методологий разработки образовательных программ является STEM – подход, в основе которого заложена квинтэссенция различных направлений естественных наук. В работе предложена модель модернизации образовательных программ инженерных направлений подготовки (математика, физика, инженерия) института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ на базе STEM – технологии и проектного подхода к обучению. Обсуждаются особенности интеграции проектных модулей (например, «Проектно-инженерного модуля») в образовательные программы и реализация на их основе базовой подготовки инженера.

Работа выполнена в рамках реализации мероприятий ФИП при МИНОБРНАУКИ РФ «Проектные практики как ключевой фактор индивидуализации в инженерном образовании»

Список литературы

1. Woei Hung, Theory to reality: a few issues in implementing problem-based learning // Education Tech Research Dev (2011) 59:529–552
2. R. Graham, The global state of the art of in engineering education – Massachusetts Institute of Technology – ISBN 13: 97806920892002018 – 2018

С.В. ГЕНИСАРЕТСКАЯ, А.А. СОЛОВЬЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК: ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ

Новый подход в образовании акцентирует внимание на активном обучении, где студенты становятся конструкторами знаний. Использование кейс-ориентированных заданий способствует развитию критического, логического мышления и практических навыков, что улучшает понимание естественных наук и их применения в реальной жизни, повышая мотивацию к обучению.

S.V. GENISARETSKAYA, A.A. SOLOVYOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

IMPROVING THE QUALITY OF EDUCATION IN THE FIELD OF NATURAL SCIENCES: CHALLENGES AND SOLUTIONS

The new approach in education emphasizes active learning, where students become constructors of knowledge. The use of case-oriented tasks fosters the development of critical and logical thinking as well as practical skills, enhancing the understanding of natural sciences and their application in real life, thereby increasing motivation to learn.

Качество образования в области естественных наук является важным индикатором образовательной системы. Это подчеркивает необходимость развития у студентов навыков применения знаний в реальных жизненных ситуациях. Дискуссия о недостаточном уровне подготовки в области естественных наук, включая физику, указывают на необходимость улучшения качества образования.

Улучшение процесса обучения естественных наук требует выбора правильных методов и подходов, основанных на современных исследованиях. Одной из концепций является модель дидактической реконструкции, которая акцентирует внимание на потребностях и возможностях учащихся. Важно, чтобы исследовательская и развивающая деятельность в образовательном процессе были тесно связаны. Обучение естественным наукам должно быть интегрировано с исследовательской работой, что является необходимым условием для повышения качества образования.

Современные подходы к обучению физике акцентируют внимание на активной роли учащихся в процессе обучения. Переход к парадигме, основанной на деятельности учащихся, предполагает, что они становятся активными конструкторами знаний, а не пассивными получателями информации. К конструктивизму, который возник в 90-х годах XX века, относится идея о том, что знания конструируются учащимися на основе их опыта.

Важным аспектом является использование контекстов в обучении, что может повысить понимание учащимися окружающего мира и соответствовать потребностям общества. Применение кейс-ориентированных заданий, как инструмента междисциплинарной науки может значительно обогатить учебный процесс. Это позволит учащимся лучше понять взаимосвязи между живой и неживой природой, а также развить навыки критического мышления, логики и самостоятельного вывода.

Таким образом, для повышения качества образования в области естественных наук необходимо внедрение новых подходов, которые будут способствовать активному участию учащихся в процессе обучения, а также интеграции теоретических знаний с практическими примерами из жизни и природы.

Список литературы

1. Леонтович, А.В. (2006). Концептуальные основания моделирования исследовательской деятельности учащихся. Школьные технологии, 5, 63-71.
2. Обухов, А.С. (2006). Развитие исследовательской деятельности учащихся. Москва: Прометей МПГУ, 224.
3. Зимняя И.А., Шашенкова Е.А. (2001). Исследовательская работа как специфический вид человеческой деятельности. Ижевск: ИЦПКПС, 103.

Секция
Физика кинетических явлений и масс-спектрометрия

Руководитель секций

ТРОНИН И.В., к.ф.-м.н., доцент,
и.о. зав. каф. №10

Секретарь секций

БЫРКИН В.А., к.ф.-м.н., доцент
кафедры №10

E-mail: VAByrkin@mephi.ru

С.С. ПОТЕШИН, Д.Д. ОДИНЦОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТРАНСПОРТ ИОНОВ В УЗКИХ ГАЗОНАПЛНЕННЫХ КАНАЛАХ

Рассмотрены эффективные ионно-транспортные устройства в виде узких каналов, которые существенно уменьшают газовую нагрузку на насосы в интерфейсах масс-спектрометров.

S.S. POTESHIN, D.D. ODINTSOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ION TRANSPORT IN NARROW GAS-FILLED CHANNELS

Ion transport devices in the form of narrow channels, which significantly reduce the gas load on pumps in mass spectrometer interfaces, are considered.

Чувствительность проведения анализа является одной из самых важных характеристик масс-спектрометра (МС). Если источник ионов МС работает при атмосферном давлении, для транспорта ионов в камеру масс-анализатора используют интерфейс дифференциальной откачки (ИДО). Соответственно, коэффициент пропускания ионов через ИДО будет во многом определять чувствительность прибора.

Газовая нагрузка на средства откачки определяется параметрами диафрагм между камерами ИДО. Чтобы уменьшить эту нагрузку, следует увеличивать длину каналов, которые связывают камеры ИДО. Произведем сравнительную оценку проводимости длинного прямоугольного канала и отверстия. Для канала проводимость можно оценить по формуле $U_{chan}=865 \cdot 4.5 a \cdot b^3 \cdot P_{mid}/L$, где a и b – размер длинной и короткой стороны канала, P_{mid} – среднее давление в канале, L – длина канала. Проводимость диафрагмы – $U_{hol}=160 d_{hol}^2$, где d_{hol} – диаметр диафрагмы. Если взять канал с сечением 1x6 мм и длиной $L=100$ мм и если взять диафрагму с аналогичной площадью апертуры, то поток через нее будет примерно в 10 раз выше. Т.е. в случае применения канала, можно использовать насос со скоростью откачки в 10 раз меньшей, чем для диафрагмы.

Для транспорта ионов в ИДО обычно используются различные мультипольные устройства с радиочастотным питанием, например, такие как квадруполи, ионные воронки. Но для транспорта ионов в каналах очень удобно использовать поле бегущей волны, когда на последовательность электродов вдоль канала подается радиочастотное питание со сдвигом фаз. В качестве удерживающего и транспортирующего ионы поля используется поле бегущей волны. Свойства таких полей были всесторонне исследованы Бердниковым А.С. [1]. Поле бегущей волны, при определенном режиме питания, формирует эффективное удерживающее и транспортирующее поле. Нами предлагается устройство для транспорта ионов в канале [1], которое показано на Рис. 1. Был проведен цикл моделирований движения ионов с учетом газового потока в канале с целью поиска оптимальной конфигурации электродов и их параметров питания. В итоге, были выбраны следующие параметры: сечение канала 0.8x5 мм, шаг электродов 0.4 мм, длина – 100 мм. Электроды объединены в 4 группы. Оптимальное питание, найденное в результате моделирования, которое обеспечивает 100% прохождения ионов в диапазоне 70..1000 M/Z, - амплитуда $Vpp=30...80$ В, частота $f=2.5$ МГц.

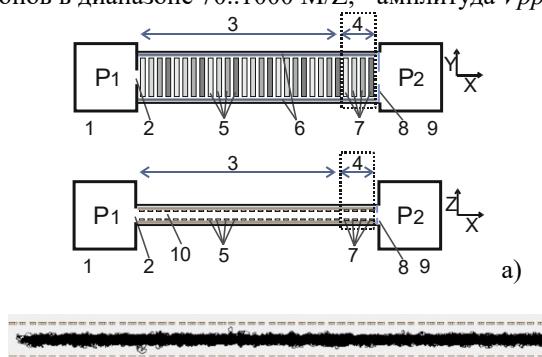


Рис. 1. Устройство для транспорта ионов в виде узкого канала с полем бегущей волны (а) и смоделированные траектории в канале в программе SIMION. 6)

В настоящее время проводится экспериментальная проверка работы подобных канальных ионно-транспортных систем. Первичные результаты измерения прохождения ионных токов показали значения в районе 70-90% пропускания для ионов с разными M/Z .

Список литературы

1. Бердников А.С. //Научное риборостроение, 2011, том 21 Ч1-4.
2. Потешин С.С./ патент RU2824941C1.

Д.Д. ОДИНЦОВ, С.С. ПОТЕШИН
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АБЕРРАЦИОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ С МОДЕЛИРОВАНИЕМ В SIMION

Проведено сравнение результатов, полученных с помощью программы расчёта, в основе которой лежит aberrационная теория для ионно-оптических систем, с результатами моделирования в Simion. Сравнение проводилось как для отдельных компонентов таких как цилиндрические электростатические сектора и дрейфовые промежутки, так и для их комбинаций, образующих вместе многооборотный секторный времяпролетный масс-анализатор. Результаты сравнения свидетельствуют о возможности применимости программы для расчёта многооборотных масс-анализаторов и поиска оптимальных геометрий.

D.D. ODINTSOV, S.S. POTESHIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

COMPARISON OF THE RESULTS OF THE ABERRATION APPROACH FOR CALCULATING ELECTROSTATIC MASS ANALYZERS WITH SIMULATION IN SIMION

The results obtained using the calculation program based on the aberration theory for ion-optical systems are compared with the results of modeling in Simion. The comparison was made both for individual components such as cylindrical electrostatic sectors and drift gaps, and for their combinations that together form a multi-turn sector time-of-flight mass analyzer. The comparison results indicate the applicability of the program for calculating multi-turn mass analyzers and searching for optimal geometries.

Наиболее перспективным типом масс-анализатора можно считать многопроходный времяпролетный МА[1]. У него есть несколько объективных достоинств, которые подтверждают это утверждение. Для проектирования новых перспективных геометрий необходима программа, которая смогла бы рассчитывать такие системы и проводить поиск оптимальных конструкций. Использование aberrационной теории для ионно-оптических систем[2] позволяет проводить такие расчёты с необходимой точностью за приемлемые промежутки времени.

В работе представлены результаты сравнения реализованной программы расчёта с данными моделирования в Simion. Сравнение проводилось для цилиндрических электростатических секторов и дрейфовых промежутков, а также их различных комбинаций.

Программа расчёта позволяет рассчитывать трансфер матрицы для аппроксимации третьего порядка для цилиндрических электростатических секторов, дрейфовых пространств и их комбинаций. Для проверки корректности результатов расчёта была написана подпрограмма для Simion, которая позволяет моделировать движение заряженных частиц через теоретическое поле цилиндрического конденсатора, дрейфовый промежуток и их комбинаций. Запускались ионы с энергетическим разбросом $\pm 4\%$, ионы с угловым разбросом $\pm 1^\circ$ и ионы с радиальным разбросом ± 1 мм. Моделировалось и рассчитывалось время пролёта (TOF). Анализ полученных данных сравнения подтвердил правильность результатов, получаемых с помощью программы расчёта. Как и ожидалось учёт коэффициентов более высокого порядка увеличивает разброс (энергетический, угловой и радиальный), для которого расчёт даёт корректные результаты в сравнении с моделированием в Simion. Для наглядности ниже в (табл. 1) приведены значения модуля максимального отклонения времени пролёта между расчётом и моделированием в Simion в %.

Табл. 1. Модуль максимального отклонения для разности времён пролёта между расчётом и моделированием в Simion (в %)

Разброс Порядок	Энергетический	Угловой	Радиальный
1	0.02	0.008	1.9E-4
1 и 2	1.6E-4	2.8E-5	2.9E-5
1, 2 и 3	1.7E-6	4.6E-6	1.8E-6

Полученные результаты сравнения свидетельствуют о правильности работы расчётной программы. Также стоит отметить, что время, затраченное на расчёт системы, состоящей из двух секторов, разделённых дрейфовым промежутком, составляет порядка нескольких мкс, в то время как моделирование той же системы в Simion занимает примерно несколько секунд. Это обстоятельство является критическим во время проведения поиска оптимальных геометрий, когда происходит перебор множества кандидатов.

Список литературы

1. A. N. Verenchikov, V. V. Makarov, A. V. Vorobyev, and S. N. Kirillov, “A Perspective of Multi-Reflecting TOF MS,” *Mass Spectrom Rev*, Nov. 2024, doi: 10.1002/mas.21915.
2. M. Yavor, “Chapter 2 Language of Aberration Expansions in Charged Particle Optics,” vol. 157, 2009, pp. 33–93. doi: 10.1016/S1076-5670(09)01602-4.

М.Н.КРАЙНОВ, А.Ю.АДАМОВ, А.А.СЫСОЕВ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА НОВОГО ТАНДЕМНОГО ТРЕХКВАДРУПОЛЬНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА С ДЕТЕКТОРОМ ИОНОВ ВЭУ-6М-1

Оценен динамический диапазон tandemного трехквадрупольного масс-спектрометра для резерпина.

M.N. KRAYNOV, A.Yu. ADAMOV, A.A. SYSOEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DYNAMIC RANGE OF A NEW TANDEM TRIPLE QUADRUPOLE MASS SPECTROMETER WITH ION DETECTOR SEM-6M-1

Dynamic range of a tandem triple quadrupole mass spectrometer is estimated for reserpine.

Динамический диапазон является важной характеристикой масс-спектрометров, которая оказывает сильное влияние на результаты количественного анализа многокомпонентных смесей. В случае многокомпонентного анализа наличие широкого диапазона, при котором сохраняется линейность отклика прибора, позволяет количественно определить разные компоненты пробы, разница концентраций которых может достигать нескольких порядков, за одно измерение. В случае же недостаточного диапазона линейности отклика определение концентрации отдельных компонент в пробе может потребовать дополнительной пробоподготовки и дополнительных измерений.

Для оценки динамического диапазона tandemного трехквадрупольного масс-спектрометра, разработанного в НИЯУ МИФИ, была проведена серия экспериментов со стандартными образцами. В качестве эталона был использован резерпин, который разбавляли в смеси ацетонитрил/вода (1:1) с 0,1% добавлением муравьиной кислоты. Для этого использовались следующие реагенты: резерпин (РЗП-ВНИИМ-ЭС) ГСО 12061-2022, ацетонитрил нулевого сорта ОСЧ HPLS grade (для хроматографии), деионизированная вода (Milly-Q), а также муравьиная кислота HPLC grade (для хроматографии). При пробоподготовке учитывались рекомендации ICH и SANCO [1]: использовалось шесть стандартных образцов с концентрациями в диапазоне от 100 пг/мл до 10 мкг/мл, равномерно распределенными друг относительно друга. В процессе анализа ввод осуществлялся посредством ручной инжекции 20 мкл стандартного образца в поток растворителя, формируемый жидкостным хроматографом. Для каждого индивидуального стандартного образца было проведено 5 измерений. С целью минимизации вклада эффекта памяти ввод стандартных образцов осуществлялся в порядке возрастания концентраций.

Проверка результатов проводилась в два этапа – сначала был проведен визуальный осмотр линейности полученных значений (согласно рекомендациям ICH, AOAC и Eurachem [1]), после чего была произведена статистическая оценка отклонений от линейности. Графический анализ данных выявил наличие гетероскедастичности, которая выражалась в увеличении значений дисперсии при увеличении концентрации резерпина в вводимом растворе. Поэтому вместо использования общего метода наименьших квадратов было решено применить взвешенный метод наименьших квадратов. В результате исследований было показано, что динамический диапазон прибора составляет 10^5 .

Список литературы

1. Kruve A. et al. Tutorial review on validation of liquid chromatography–mass spectrometry methods: Part II // Anal. Chim. Acta. Elsevier, 2015. Vol. 870, № 1. P. 8–28.

М.М. ШИШИРИН, А.Ю. СМИРНОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ КВАЗИДЕАЛЬНОГО КАСКАДА С РАЗЛИЧНЫМИ СРЕЗАМИ ПАРЦИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В СЕКЦИЯХ

Получена обобщенная модель квазидеального каскада с различными величинами срезов парциальных потоков в различных секциях каскада. Разработана методика оптимизации такого каскада на заданные концентрации целевого компонента в выходящих потоках путем перебора различных комбинаций длин секций каскада при заданных концентрациях целевого компонента в его выходящих потоках и величин массовых чисел опорных компонентов. Проведено сравнение эффективности нескольких вариантов квазидеальных каскадов с различным числом секций, отличающихся величинами срезов парциальных потоков ступеней. Показано, что увеличение числа секций с различными срезами парциальных потоков позволяет обеспечить более эффективную работу каскада с точки зрения минимума суммарного относительного потока при заданных концентрациях целевого компонента.

M.M. SHISHIRIN, A.Yu. SMIRNOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

OPTIMIZATION OF A QUASI-IDEAL CASCADE WITH VARIOUS PARTIAL FLOW CUTS IN SECTIONS

A generalized model of a quasi-ideal cascade with different values of partial flow cuts in different sections of the cascade is obtained. A technique for optimizing such a cascade for given concentrations of the target component in the outgoing flows is developed by enumerating various combinations of cascade section lengths for given concentrations of the target component in its outgoing flows and values of mass numbers of the key components. A comparison of the efficiency of several variants of quasi-ideal cascades with different numbers of sections differing in the values of partial flow cuts of the stages is carried out. It is shown that an increase in the number of sections with different partial flow cuts allows for more efficient cascade operation in terms of the minimum total relative flow for given concentrations of the target component.

Задача оптимизации каскадных разделительных установок является одной из важных в теории каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей. Важную роль при проектировании таких установок и изучении закономерностей массопереноса компонентов в них играет теория модельных каскадов. Модельные каскады получают путем сведения общих уравнений, описывающих массоперенос компонентов в симметрично-противоточном каскаде к частным случаям, позволяющим получить более простые соотношения для связи его параметров. Для моделирования массопереноса в случае разделения многокомпонентных смесей часто используют квазидеальный каскад [1–3].

Оптимизация модельных каскадов представляет собой более простую задачу, чем оптимизация произвольного каскада. При этом найденное таким путем оптимальное значение целевой функции может отличаться от значений, полученных для общего случая, лишь на доли процентов [1]. Это делает модельные каскады удобным инструментом для оценки оптимальных значений интегральных характеристик каскадной. Однако существуют и проблемы, связанные с прямым использованием результатов оптимизации модельных каскадов на практике. Например, в случае заметно отличающихся от единицы коэффициентов разделения ступени затруднительно добиться получения заданных значений концентраций целевого компонента в выходящих потоках каскада для целых величин числа ступеней в каскаде и номера ступени подачи внешнего питания.

В работе обобщена модель квазидеального каскада на случай различных значений срезов парциальных потоков в четырех его секциях (две в обогатительной части, две в обеднительной части), что расширяет число свободных параметров при решении оптимизационной задачи для такого каскада. Для обобщенной модели разработана методика оптимизации её параметров при получении заданных концентраций целевого компонента в выходящих потоках. При этом числа ступеней в каждой из секций являются целочисленными параметрами, что позволяет применять этот подход, в том числе, для случая произвольных коэффициентов разделения ступени.

По результатам серии вычислительных экспериментов показано, что оптимальный обобщенный квазидеальный каскад с четырьмя секциями с различными величинами срезов парциальных потоков оказывается более эффективным (до 15%), чем двухсекционный квазидеальный каскад и базовый вариант с одинаковой для всех ступеней величиной среза парциальных потоков.

Список литературы

1. Song T., Shi Z., Borisevich V.D. et al. // *Sep. Sci. and Techn.* 2010. Vol. 45. P. 2113–2118.
2. Sulaberidze G.A., Smirnov A.Yu., Borisevich V.D. et al. // *Ibid.* 2021. Vol. 56. No. 6. P. 1060–1070.
3. Yamamoto I., Kanagawa A. // *J. Nucl. Sci. and Techn.* 1978. Vol. 15. No.8. P. 580–584.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00688, <https://rsrf.ru/project/24-29-00688/>.

С.В. БОГОВАЛОВ, Д.Н. ДЖУЛЯ, И.В. ТРОНИН

Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗДЕЛИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРЯМОТОЧНОЙ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ С ОДНОРОДНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПОТОКА МАССЫ ИЗОТОПНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Аналитически решена задача диффузии изотопной бинарной газовой смеси в прямоточной газовой центрифуги (ГЦ) с однородным распределением плотности потока массы газа на входе ГЦ. Получена зависимость оптимальной разделительной способности ГЦ от параметров ГЦ и рабочего газа. Проведено сравнение разделительной способности прямоточных ГЦ с разной организацией потока питания, предложен способ повышения эффективности прямоточных ГЦ за счёт изменения радиального распределения плотности потока массы в ГЦ.

S.V. BOGOVALOV, D.N. DZHULYA, I.V. TRONIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SEPARATION POWER OF AN OPTIMAL CONCURRENT GAS CENTRIFUGE WITH A UNIFORM MASS FLOW DENSITY OF ISOTOPIC GAS MIXTURE

The problem of diffusion of an isotopic binary gas mixture in a concurrent gas centrifuge (GC) with a uniform distribution of the gas mass flow density at the GC inlet has been analytically solved. The dependence of the optimal separation power of GC on the parameters of GC and the working gas is obtained. The separation power of concurrent GC with various feed options is compared, and a method is proposed to increase the efficiency of concurrent GC by changing the radial distribution of mass flow density in GC.

Разделительная способность газовой центрифуги (ГЦ) является основной величиной, определяющей эффективность ГЦ. Ее повышение является нашей основной целью. Исследование путей повышения разделительной способности в прямоточных ГЦ позволяет разрабатывать способы повышения разделительной способности в противоточных ГЦ.

Максимально возможная разделительная способность любой ГЦ (dU) полученная Дираком [1] даёт зависимость 4-ой степени от скорости вращения ГЦ ($dU \sim V^4$). Разделительная способность, прямоточной ГЦ рассмотренной в работе [2] пропорциональна квадрату скорости вращения ГЦ, ($dU \sim V^2$) что с точностью до коэффициента пропорциональности согласуется с экспериментальными данными для Российских противоточных ГЦ [3]. Такая слабая зависимость разделительной способности ГЦ от скорости вращения ротора наблюдается, из-за «неэффективного использования объема ГЦ». В разреженной области, которая при больших скоростях вращения занимает большую часть объема ротора, разделение ничтожно. Если это так, то увеличение плотности потока массы в разреженной области за счет увеличения скорости будет приводить к повышению разделительной способности ГЦ.

В работе [2] плотность потока экспоненциально падала к центру ротора при постоянной скорости газа вдоль ротора во всем его объеме. На примере модели прямоточной ГЦ мы рассмотрели случай с равномерным распределением плотности потока массы во всем объеме газа в ГЦ. Скорость газа экспоненциально растет к центру ротора. Решена задача диффузии бинарной изотопной газовой смеси в ГЦ, найден оптимальный поток питания, при котором разделительная способность максимальна в зависимости от скорости вращения ГЦ.

В результате, разделительная способность в случае постоянной аксиальной плотности потока массы (рис. 1, $\rho v_z = \text{const}$) зависит от скорости вращения ротора в 4-ой степени, как у Дирака (рис. 1, Dirac), но с другим коэффициентом пропорциональности и при больших скоростях вращения ротора превосходит разделительную способность в случае с постоянной аксиальной скоростью (рис. 1, $v_z = \text{const}$).

Полученные результаты подтверждают наш вывод, что разделительная способность ГЦ увеличивается при увеличении скорости газа в разреженной области. Это заставляет нас рассмотреть возможность увеличения скорости газа в разреженной области в противоточных ГЦ.

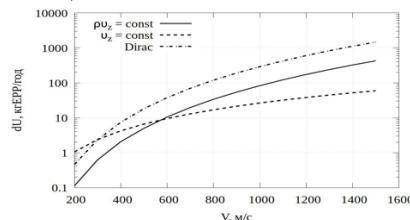


Рис. 1. Зависимость разделительной способности прямоточной ГЦ от скорости вращения ротора ГЦ в случае однородной плотностью потока массы (1), однородной аксиальной скоростью газа (2), в случае максимального разделения (Дирак [1]) (3)

Список литературы

1. P. Dirac, Unpublished paper cited in K.P. Cohen, «The Theory of Isotope Separation as Applied to Large Scale Production of U-235»; McGraw-Hill: New York (1951)
2. S. Bogovalov, V. Borman, Separative power of an optimised concurrent gas centrifuge, Nuclear Engineering and Technology 48 (3) (2016) 719-726. doi:<https://doi.org/10.1016/j.net.2016.01.024>.
3. I. Andronov, G. G.Yu., Y. Vyazovetskiy, A. Senchenkov, S. Senchenkov, comparative technical and economic characteristics of gas centrifuges of various types, Proceedings of the 4th All-Russian conference "Physicochemical processes in the selection of atoms and molecules" (in russian) (1999) 71.

С.В. БОГОВАЛОВ, А.В. ВАСИЛЬЕВ, И.В. ТРОНИН, Д.С. ЩУРОВ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ БЕСКАСКАДНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ИЗОТОПНЫХ СМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГИПЕРСКОРОСТНЫХ ЦЕНТРИФУГ

Рассмотрен подход по замене обогатительных каскадов для получения низкообогащенного урана с концентрацией 5% гиперскоростными центрифугами, скорость вращения ротора которых 1000 м/с. Показано, что в гиперскоростных центрифугах возможно получать низкообогащенный уран. Проведена оценка энергозатрат каскадов к одиночным газовым центрифугам.

S.V. BOGOVALOV, A.V. VASILYEV, I.V. TRONIN, D.S. SCHUROV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

STUDY OF THE POSSIBILITY OF CASCADE-FREE ENRICHMENT OF ISOTOPIC MIXTURES USING HYPERVELOCITY CENTRIFUGES

The approach of replacing enrichment cascades for obtaining low-enriched uranium with 5% concentration by hypervelocity centrifuges with rotor speed of 1000 m/s is considered. It is shown that it is possible to obtain low-enriched uranium in hypervelocity centrifuges. Energy consumption of cascades to single gas centrifuges has been estimated.

В современных условиях высокоскоростные газовые центрифуги представляют собой наиболее эффективный и экономически целесообразный метод разделения изотопов урана, применяемый в производстве ядерного топлива. В российской промышленности технологии центробежного разделения изотопов урана имеют длительную историю и составляют приблизительно 30% от общей стоимости ядерного топлива. Современные центрифуги способны достигать скорости вращения ротора до 900 м/с [1], используя композиты на основе углеродных нанотрубок. В перспективе ожидается разработка материалов на основе углеродного волокна, что позволит достичь скоростей выше 1000 м/с.

Данная работа включает два этапа исследования. На первом этапе была поставлена цель анализа одиночной гиперскоростной газовой центрифуги (ГГЦ) и оптимизации её характеристик с целью определения принципиальной возможности получения низкообогащенного урана в таких устройствах. В результате были получены функциональные зависимости параметров ГГЦ от геометрических характеристик ротора и концентрации целевого изотопа в потоке отбора.

На втором этапе были исследованы теоретические подходы, позволяющие заменить традиционные обогатительные каскады на ГГЦ, что может повысить энергоэффективность процесса разделения изотопов и, следовательно, снизить стоимость производства ядерного топлива.

Моделирование течения внутри газовой центрифуги Игуасу проводилось в врачающейся системе координат с осесимметричным приближением, с использованием соответствующей системы гидродинамических уравнений. В дополнение к уравнениям гидродинамики решалось уравнение конвективной диффузии для концентрации изотопа U-235 в бинарной смеси гексафторида урана (UF₆) [2]. Расчетная область была разделена на три зоны: приосевую зону разряжения, зону сплошной среды и переходную область. Однако, ввиду слабого течения в области разряжения, моделирование потоков ограничивалось зоной сплошной среды, где выполняются законы газодинамики. Переходная область, имеющая толщину всего несколько процентов радиуса, предполагалась бесконечно тонкой и моделировалась как свободная поверхность с заданными граничными условиями для потока питания.

В качестве каскада была рассмотрена модель идеального каскада, где выполняется условие несмешивания потоков, что исключает потери при процессе разделения. В то же время центрифуги, в которых концентрация в потоке отбора составляет 5%, размещались в один ряд. Сравнение проводилось по количеству используемых центрифуг при условии равного потока на выходе. Получена оценка отношения энергозатрат каскадов к одиночным центрифугам.

Список литературы

1. Glaser A. Characteristics of the gas centrifuge for uranium enrichment and their relevance for nuclear weapon proliferation // Science & Global Security. — 2008. — Vol. 16, no. 1-2. — P. 1–25.
2. Optimal working regimes of the hyper-speed long Iguasu gas centrifuge / Bogovalov S., Borman V., Vasilev A., Tronin I., and Tronin V. // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. — 2020. — Vol. 1696. — P. 012012.

А.А. БЕЛОГОРЛОВ^{1,2}, Ю.Е. ГОРШКОВА³, Г.П. КОПИЦА^{4,5}, А.И. КУКЛИН³, Д.В. ЛЬВОВ^{2,6},
П.Г. МИНГАЛЕВ⁷, А.Н. ТЮЛЮСОВ^{2,6}

¹ Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчева РАН, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт», Гатчина, Россия

⁵ Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

⁷ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАПОЛНЕНИЯ НАНОПОРИСТЫХ СИСТЕМ НЕСМАЧИВАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

Представлены результаты исследования методом малоуглового рассеяния нейтронов процесса заполнения гидрофобизированного мезоструктурированного материала на основе SiO₂ MCM-41-C1 с упорядоченной структурой цилиндрических пор. Показано, что малоугловое рассеяние нейтронов позволяет наблюдать процесс заполнения пор в исследуемом материале в диапазоне избыточных давлений 0 – 800 атм. Обнаружено качественное различие кривых малоуглового рассеяния при заполнении пор.

А.А. BELOGORLOV^{1,2}, Yu.E. GORSHKOVA³, G.P. KOPITSA^{4,5}, A.I. KUKLIN³, D.V. LVOV^{2,6},
P.G. MINGALEV⁷, A.N. TYULYUSOV^{2,6}

¹ A.V.Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS, Moscow, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

⁴ Petersburg Nuclear Physics Institute NRC KI, Gatchina, Russia

⁵ Grebenchikov Institute of Silicate Chemistry PNPI NRC KI, Adm. Makarova emb., 2, 199155 St. Petersburg, Russia

⁶ National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

⁷ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

APPLICATION OF THE SMALL-ANGLE NEUTRON SCATTERING METHOD TO STUDY THE FILLING OF NANOPOROUS SYSTEMS WITH A NON-WETTING LIQUID

The paper presents the results of a study by small-angle neutron scattering of the process of filling a hydrophobized mesostructured material based on SiO₂ MCM-41-C1 with an ordered structure of cylindrical pores. It is shown that small-angle neutron scattering makes it possible to observe the process of filling pores in the material under study in the excess pressure range of 0 – 800 atm. A qualitative difference in small-angle scattering curves was discovered when pores were filled.

Изучение взаимодействия несмачивающих жидкостей с нанопористыми материалами имеет многолетнюю историю. Эти системы интересны для создания аккумуляторов и демпферов механической энергии, систем пассивной защиты и доставки лекарств.

Важной задачей исследования процессов взаимодействия несмачивающих жидкостей с нанопористыми материалами является определение механизмов диспергирования жидкостей в пространстве материала. Одним из возможных методов для реализации поставленной задачи может быть метод малоуглового рассеяния нейтронов. Метод широко применяется для исследования пористых материалов, но для задачи исследования процесса заполнения нанопористых материалов несмачивающими жидкостями используется впервые.

Исследования проводились на спектрометре малоуглового рассеяния ЮМО реактора ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна, Россия). Для эксперимента были разработаны и изготовлены стенд и экспериментальная ячейка высокого давления. В работе представлены результаты исследования методом малоуглового рассеяния нейтронов процесса заполнения гидрофобизированного мезоструктурированного материала на основе SiO₂ MCM-41-C1 с упорядоченной структурой цилиндрических пор.

Результаты измерений позволяют сделать вывод, что во всём диапазоне давлений пространственная структура пор не меняется. Также наблюдалось, что за время измерений параметры системы не изменяются в пределах точности измерений. Обнаружено качественное различие кривых малоуглового рассеяния при заполнении пор водой.

Показано, что малоугловое рассеяние нейтронов позволяет наблюдать процесс заполнения пор в исследуемом материале в диапазоне избыточных давлений 0 – 800 атм.

Ф.С. ДЖЕПАРОВ^{1,2}, Д.В. ЛЬВОВ^{1,2}, А.Н. ТЮЛЮСОВ^{1,2}, Й. ШМАЙСНЕР^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

РАСЧЕТ ПАРНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЙ ОБРАЗЦА

Рассмотрена задача определения парной корреляционной функции неоднородностей материала исходя из данных, полученных для образца малого размера. Проведен анализ влияния на парную корреляционную функцию размера и формы образца. Получено общее выражение для геометрического множителя, учитывающего данное влияние. Приведены примеры расчета парной корреляционной функции с учетом геометрического множителя на модельных системах прямоугольной, цилиндрической и конической геометрий.

F.S. DZHEPAROV^{1,2}, D.V. LVOV^{1,2}, A.N. TYULYUSOV^{1,2}, J. SCHMEISSNER^{1,2}

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

² National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

PAIR CORRELATION FUNCTION VALUATION IN SAMPLES WITH VARIOUS GEOMETRIES

The problem in determining the pair correlation function of material inhomogeneities based on a data obtained for a small-sized sample is considered. An analysis of the samples size and shape influencing the pair correlation function is performed. A general expression for the geometric factor for such influence is obtained. The examples of the pair correlation function calculation using the geometric factor on model systems of rectangular, cylindrical and conical geometries are given.

В последнее время исследования мезомасштабных (от нескольких нанометров до нескольких микрон) структур проводятся одновременно микроскопическими и спектроскопическими методами. Одним из таких объединений экспериментальных методов является применение атомно-зондовой томографии [1,2] в связке с малоугловым рентгеновским и нейтронным рассеянием [3]. Однако для корректной обработки малоугловых спектров необходимо получение информации о пространственной парной корреляционной функции (радиальной функции распределения) расположения рассеивающих неоднородностей в исследуемом материале. Определить вид парной корреляционной функции можно двумя способами: смоделировать систему на основе предполагаемого эффективного взаимодействия частиц или получить информацию о пространственном распределении центров напрямую при помощи наблюдения микроскопическим методом, таким как атомно-зондовая томография.

Текущие алгоритмы расчета парной корреляционной функции основаны на выделении системы сферического или кубического объема, размеры которого существенно превышают характерную длину корреляции. Специфическая геометрия исследуемых образцов в методе атомно-зондовой томографии, представляющих собой тонкие вытянутые иголки, потребовала построения нового алгоритма расчета парной корреляционной функции. Для этого были рассмотрены системы с прямоугольной, цилиндрической и конической геометрией, наиболее похожей на реальные образцы. Получено аналитическое выражение на геометрический множитель, учитывающий пространственные ограничения при расчете парной корреляционной функции для данных систем, и приведены примеры расчетов парной корреляционной функции для модельных систем с известной пространственной корреляцией.

Список литературы

1. С. В. Рогожкин, А. А. Алеев, А. А. Лукьянчук А. С. Шутов, О.А. Разинцын, С.Е. Кириллов, Прототип атомного зонда с лазерным испарением, Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 3. – С. 129-134.
2. Rogozhkin, S.V.; Klauz, A.V.; Ke, Y.; Almásy, L.; Nikitin, A.A.; Khomich, A.A.; Bogachev, A.A.; Gorshkova, Y.E.; Bokuchava, G.D.; Kopitsa, G.P.; et al. Study of Precipitates in Oxide Dispersion-Strengthened Steels by SANS, TEM, and APT. Nanomaterials 2024, 14, 194.
3. Ф.С. Джепаров, Д.В. Львов, Нейтронные исследования конденсированных сред. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 188 с.

Ф.С. ДЖЕПАРОВ, Д.В. ЛЬВОВ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТЕОРИЯ МНОГОКРАТНОГО МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ОБРАЗЦАХ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ЯДРАМИ

Проведен анализ многократного малоуглового рассеяния нейтронов с учетом псевдомагнитного взаимодействия. С использованием проекционной техники Накаджима-Цванцига построено кинетическое уравнение для фурье-образа интенсивности рассеяния, усредненного по спинам среды. Показано, что при коллинеарной ориентации начальной поляризации нейтронов и ядер спиновая часть рассеяния нейтронов определяется средней величиной псевдомагнитного ядерного поля, а флуктуации поля приводят к деполяризации нейтронов.

F.S. DZHEPAROV, D.V. LVOV

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THEORY OF MULTIPLE SMALL-ANGLE NEUTRON SCATTERING BY SAMPLES WITH POLARIZED NUCLEI

The analysis of multiple small-angle neutron scattering is carried out taking into account pseudomagnetic interaction. Using the Nakajima-Zwanzig projection technique, a kinetic equation is constructed for the Fourier transform of the scattering intensity averaged over the spins of the medium. It is shown that, with collinear orientation of the initial polarization of neutrons and nuclei, the spin part of neutron scattering is determined by the average value of the pseudomagnetic nuclear field, and field fluctuations lead to neutron depolarization.

Многие из свойств веществ, находящихся в конденсированном состоянии, обусловлены неоднородностями состава, имеющими надатомные размеры: выделением фаз, присутствием в объеме пор (пустот), зерен, скоплений дислокаций и т.д. Для получения соответствующей информации широко используется метод малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН). При построении теории многократного малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) обычно пренебрегают спиновой частью взаимодействия нейтронов с неоднородностями вещества [1], а также не учитывают корреляции в пространственном расположении рассеивающих центров. Наличие у нейтрана спина при рассеянии на ядрах, также обладающих неценевым спином, приводит к наличию дополнительного слагаемого в выражении для потенциала сильного взаимодействия, зависящего от взаимного направления спинов нейтрана и ядра (псевдомагнитное взаимодействие). Для получения поляризованных мишеней используется метод динамической поляризации, что дает возможность варьирования контраста при проведении экспериментов по малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов и существенно увеличивает разрешающую способность метода МУРН. В настоящее время метод динамической поляризации ядер в однократном малоугловом рассеянии нейтронов активно используется и развивается.

В данной работе мы провели анализ многократного МУРН с учетом псевдомагнитного взаимодействия. Проведено обобщение теории многократного малоуглового рассеяния [2], учитывающей корреляции в расположении рассеивателей, на случай рассеяния поляризованных нейтронов на поляризованных мишенях. При построении теории амплитуда рассеяния выбирается в приближении эйконала. В данном случае решение выражается через упорядоченную экспоненту вдоль классической траектории (типа Т-экспоненты). Поэтому, в отличие от [2], решение не представимо в квадратурах, и для получения наблюдаемых следствий мы с использованием проекционной техники Накаджима-Цванцига построили кинетическое уравнение для фурье-образа интенсивности рассеяния, усредненного по спинам среды. Показано, что при учете спиновых эффектов общая структура теории остается прежней. При коллинеарной ориентации начальной поляризации нейтронов и ядер спиновая часть рассеяния нейтронов определяется средней величиной псевдомагнитного ядерного поля, а флуктуации поля приводят к деполяризации нейтронов.

Показано, что использование метода динамической поляризации для создания поляризованных мишеней дает возможность варьирования контраста и увеличения информативности способности метода многократного МУРН.

Мы благодарны профессору Г. Глэтли за привлечение нашего внимания к МУРН на ядерных поляризованных мишенях и за полезные обсуждения.

Список литературы

1. С.В Малеев., Б.П. Топерверг // ЖЭТФ, 1980, т. 78, с. 315.
2. Ю.Г. Абов, Ф.С. Джепаров, Н.О. Елютин, Д.В. Львов, А.Н. Тюлюсов // ЖЭТФ, 2013, т. 143, стр. 507-517.

А.С. ГИЗЗАТОВ, Ю.С. ЕРЕМИН, М.А. ПЕТРОВ, А.М. ГРЕХОВ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ГРАФЕНА НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ИЗ ПОЛИСУЛЬФОНА

Рассмотрены зависимость проницаемости и коэффициента удержания полимерных нанокомпозитных мембран из полисульфона от массовой концентрации оксида графена в изготовленных пленках. Методом изготовления мембран была выбрана инверсия фаз, концентрация оксида графена в мембранах от 0 до 0.5%.

A.S. GIZZATOV, Y.S. EREMIN, A.M. PETROV, A.M. GREKHOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE INFLUENCE OF GRAPHENE OXIDE NANOPARTICLES ON THE TRANSPORT PROPERTIES OF POLYMER MEMBRANES MADE FROM POLYSULFONE

The influence of graphene oxide nanoparticles on the transport properties of polymer membranes made from polysulfone was investigated. The dependence of permeability and retention coefficient of polymer nanocomposite membranes made from polysulfone on the mass concentration of graphene oxide in the fabricated films was studied. The phase inversion method was selected for membrane fabrication, with graphene oxide concentration in the membranes ranging from 0 to 0.5%.

В настоящее время стоит проблема в нехватке питьевой и промышленной воды, существует множество методов очистки сточных вод, один из которых мембранный фильтрация, состоящая из нескольких этапов фильтраций, для каждой из которых нужны мембранные с разными размерами пор. Основными материалами, из-за своей износостойкости и химической устойчивости, являются металлы и керамика, хуже себя показывают полимерные мембранны. С внедрением различных добавок в структуру мембранны можно существенно изменить транспортные, селективные и другие свойства мембранны, что поможет удешевить производство мембранных модулей.

В нашей работе исследовано влияние внедрения наночастиц (НЧ) оксида графена (ОГ) на транспортные и селективные свойства полимерных асимметричных мембран из полисульфона (ПСФ) при различных давлениях. Исследуемые образцы были изготовлены с помощью метода инверсии фаз, растворителем для суспензий был использован диметилформамид (ДМФ). Массовая концентрация ПСФ в суспензии составила 15 и 20%, концентрация ОГ в изготовленных мембранных от 0 до 0.5%. Измерения проницаемости проводились на экспериментальном стенде ИТЖМ, описание в работе [1]. Расчет коэффициента удержания мембранны проводился с помощью коэффициент преломления пермеата, измеренного на рефрактометре Abbemat MW.

Было получено, что внедрение ОГ приводит к изменению транспортных и селективных свойств изготовленных мембранны. К примеру, нелинейное зависимость проницаемости от концентрации ОГ, добавление 0.1% НЧ увеличивает проницаемость дистиллированной воды в 3.1 раза, дальнейшая добавка уменьшает проницаемость в 2.8 раз. Такие результаты обусловлены внедрением ОГ в структуру мембранны.

Список литературы

1. Yampolskii Yu.P., Starannikova L.E., Belov N.A. // Hybrid Gas Separation Polymeric Membranes Containing Nanoparticles // Petroleum Chemistry. 2014. Vol. 54, № 8. P. 637–651.

Э.Р. ХАЗЕЕВА, Ю.С. ЕРЕМИН, А.М. ГРЕХОВ, С.В. ФАДЕЕВ, А.А. ПЛЕХАНОВ
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЛЕНОК ИЗ ПОЛИСУЛЬФОНА С ВНЕДРЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ И ГРАФЕНОМ

Проведены измерения в УФ-, видимом и терагерцовом диапазонах пленок из полисульфона с внедренными углеродными нанотрубками и графеном. Выявлено, что добавление углеродных наночастиц приводит к увеличению поглощательной способности пленок в данных диапазонах частот, что может быть использовано при разработке материалов для экранирования электромагнитного излучения.

E.R. KHAZEEVA, YU.S. EREMIN, A.M. GREKHOV, S.V. FADEEV, A.A. PLEKHANOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

RESEARCH OF THE TRANSMISSION CAPACITY OF POLYSULFONE FILMS WITH EMBEDDED CARBON NANOTUBES AND GRAPHENE

Measurements were carried out in the UV, visible and terahertz ranges of polysulfone films with embedded carbon nanotubes and graphene. It was found that the addition of carbon nanoparticles leads to an increase in the absorption capacity of the films in these frequency ranges, which can be used in the development of materials for shielding electromagnetic radiation.

С каждым днем количество окружающего человека электромагнитного излучения (ЭМИ) растет (рис. 1), и увеличивается потребность в экранировании электромагнитных помех, поскольку ЭМИ может негативно сказаться на здоровье человека и электронных устройствах; также существует необходимость в экранировании ЭМИ для защиты информации, для повседневных целей и для создания радиопоглощающих материалов. Для таких целей обычно используются материалы на основе металлов, однако они обладают рядом недостатков: преобладание отражения излучения над поглощением (что вызывает электромагнитное загрязнение), склонность к окислению, плохая устойчивость к износу, высокая плотность и недостаточная гибкость. В качестве альтернативы предлагается использовать полимерные нанокомпозиты с внедренными углеродными наночастицами, такими как углеродные нанотрубки (УНТ) и графен, поскольку они обладают рядом преимуществ: гибкостью, низким удельным весом, большим вкладом в поглощение, а не отражение излучения, а также превосходными термическими, механическими и электрическими свойствами.

В работе изучаются полимерные пленки из полисульфона (ПСФ) с внедренными углеродными нанотрубками и пленки из ПСФ с внедренными наночастицами графена в УФ-, видимом (190-1100 нм) и терагерцовом (ТГц) диапазонах (0,5-1,5 ТГц). Для измерений использовались спектрофотометр HACH DR 5000 (УФ- и видимый диапазоны) и экспериментальная установка для измерений в ТГц диапазоне.

Для измерений использовались пленки из ПСФ со средней толщиной 10, 35, 65 мкм с внедренными УНТ и пленки из ПСФ с графеном со средней толщиной 17 и 75 мкм с концентрациями от 0 до 3% с шагом в 0,25%. В УФ области полисульфон практически непрозрачен для излучения; в видимом диапазоне длин волн добавление УНТ или графена приводит к существенному увеличению поглощательной способности пленок. В ТГц диапазоне наблюдается неявная зависимость оптической плотности от частоты; внедрение углеродных наночастиц приводит к увеличению поглощения излучения.



Рис. 1. Человек, окруженный электромагнитным оборудованием [1]

Список литературы

1. Gunwant D., Vedrtnam A. Microwave absorbing properties of carbon fiber based materials: A review and prospective //Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Т. 881. – С. 160572.

М.А. ПЕТРОВ, Ю.С. ЕРЕМИН, А.М. ГРЕХОВ

Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С ВНЕДРЕННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА ГРАФЕНА

Синтезированы композитные материалы на основе поливинилового спирта с внедренными наночастицами оксида графена методом испарения растворителя. Исследованы оптические, механические и термические свойства полученных композитов.

М.А. PETROV, Yu.S. EREMIN, A.M. GREKHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

POLY(VINYL ALCOHOL)-BASED POLYMERIC COMPOSITES WITH INCORPORATED GRAPHENE OXIDE NANOPARTICLES

Composite materials based on poly(vinyl alcohol) with embedded graphene oxide nanoparticles were synthesized using the solvent evaporation method. Optical, mechanical and thermal properties of the obtained composites were studied.

Одной из актуальных задач современного материаловедения является поиск новых материалов с улучшенными свойствами для различных отраслей промышленности. Скорость синтеза новых полимеров относительна низка, что приводит к необходимости создания полимерных композитов. Перспективным методом их получения является внедрение наночастиц различной природы, из которых отдельно можно выделить частицы на основе графена. Графен является двумерным материалом с уникальным набором механических, термических и электрических свойств. Данное обстоятельство позволяет добиваться значительного изменения свойств композита даже при малых концентрациях наполнителя.

Целью данной работы являлось исследование оптических, термических и механических свойств пленок из поливинилового спирта с внедренными частицами оксида графена (ОГ). Образцы были изготовлены методом испарения растворителя, доля ОГ в пленках составила от 0 до 1%. Проведены механические испытания пленок, их спектрофотометрический и термомеханический анализы.

Измерения оптической плотности полученных образцов в ультрафиолетовом и видимом диапазоне указывают на успешное диспергирование наночастиц ОГ в объеме полимера. Механические испытания показали незначительное изменение модуля упругости пленок для всех концентраций наполнителя (в пределах 10% от среднего значения). Внедрение ОГ улучшило термическую стойкость образцов, при этом с увеличением концентрации ОГ происходило усиление эффекта.

Семинар
Физика экстремального состояния вещества
на лазерном комплексе ЭЛЬФ

Руководитель секций

д.ф.-м.н., профессор, директор
Института ЛаПлаз
– КУЗНЕЦОВ А.П.,
к.ф.-м.н., с.н.с., Лаб.1.1. ОИВТ РАН
- АЛХИМОВА М.А.

Секретарь секций

E-mail: maryalkhimova@ihed.ras.ru

КУЗНЕЦОВ А.П.¹, ДЕРКАЧ В.Н.², ГАРАНИН С.Г.², ЛОБАНОВ А.В.¹, КРАВЧЕНКО В.В.¹,
МИХАЙЛЮК А.В.¹, МЕЛЕХОВ А.П.¹, КАДЫРОВ А.Э.¹, ЦАРЁВ М.С.¹, ДЕШИН Д.А.¹, ДУДАЛИН М.С.¹,
¹, ВОЛКОВ К.И.¹, КАЗАРЦЕВ Г.А.¹, РАДЫГИН Д.Е.¹, АБАКУМОВ Ю.М.¹, КУЛИКОВ М.А.¹,
ДЕГТЬЯРЕВ М.В.¹, РЫНДЫК Е.Р.¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики - Российский федеральный
ядерный центр, Саров, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ЭЛЬФ» СТАТУС ПРОЕКТА

Представлены результаты работы по созданию многофункционального лазерного комплекса килоджоульного уровня энергии «ЭЛЬФ», создаваемой в формате «user facility», для проведения экспериментов для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач в области физики высокой плотности энергии и экстремального состояния вещества.

KUZNETSOV A.P.¹, DERKACH V.N.², GARANIN S.G.², LOBANOV A.V.¹, KRAVCHENKO V.V.¹,
MIKHAYLYUK A.V.¹, MELEKHOV A.P.¹, KADYROV A.E.¹, TSAREV M.S.¹, DESHIN D.A.¹,
DUDALIN M.S.¹, VOLKOV K.I.¹, KAZARTSEV G.A.¹, RADYGIN D.E.¹, ABAKUMOV U.M.¹,
KULIKOV M.A.¹, DEGTYAREV M.V.¹, RYNDYK E.R.¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF)

EXPERIMENTAL LASER FACILITY "ELF". PROJECT STATUS

The results of the work on the creation of a multifunctional kilojoule energy laser "user facility" complex "ELF" for conducting experiments to solve a wide range of fundamental and applied problems in the field of high-energy density physics and extreme states of matter are presented.

Проект экспериментального лазерно-физического комплекса ЭЛЬФ предполагает создание установки с управляемыми временными, спектральными и энергетическими параметрами, состоящей из двух лазерных каналов с возможностью использования в одном эксперименте импульсов с управляемой временной задержкой: наносекундного импульса с энергией до 5 кДж (на 2-й гармонике) (длительность $(1 - 10) \cdot 10^{-9}$ с) (плотность мощности на мишени до 10^{16} Вт/см²) и субпикосекундного импульса энергией до 200 Дж (длительность $\sim 0.7 \cdot 10^{-12}$ с) (плотность мощности на мишени до 10^{20} Вт/см²). Технические возможности лазерной установки, создаваемой в формате «laser user facility», с предоставлением «пучкового времени» пользователям из академического сообщества позволят проводить эксперименты для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач в области физики высокой плотности энергии и экстремального состояния вещества.

Проект «ЭЛЬФ» реализуется поэтапно, что позволит наращивать энергетические и функциональные возможности установки и тем самым на всех этапах создания установки проводить экспериментальные исследования по направлениям, для которых достигнутые энергетические значения будут достаточными.

Первый этап предполагает запуск наносекундного канала и вводом излучения в мишеннюю камеру МК-1, оснащенную средствами измерений, обеспечивающими проведение широкого спектра исследований по ударно-волновому нагружению веществ и физике высокотемпературной плазмы.

Второй этап – запуск второго, пикосекундного канала и ввод излучения нс- и пс- каналов в мишеннюю камеру МК-2, оснащенную средствами измерений, обеспечивающими проведение широкого спектра исследований в физике экстремального состояния вещества.

Конструкция экспериментального лазерно-физического комплекса «ЭЛЬФ» представляет собой инженерно-технический комплекс в состав, которого входят следующие основные узлы и системы:

- Двухканальная лазерная установка, в составе: системы формирования опорного излучения наносекундного и пикосекундного каналов; стретчера (устройства растяжения во времени лазерного импульса) для пикосекундного канала; каскадов предварительного усиления с системами пространственного профилирования пучка; основного силового усилителя; преобразователя излучения во 2-ю или 3-ю гармонику для наносекундного канала; компрессора (устройства сжатия во времени усиленного лазерного импульса) для пикосекундного канала; оптических систем транспортировки лазерного излучения в камеру взаимодействия (мишеннюю камеру);

- система накопления и коммутации электрической энергии (емкостной накопитель энергии);
- информационно-управляющая система;
- мишеннюя камера (камера взаимодействия);
- комплекс диагностики параметров лазерного излучения;
- комплекс диагностики параметров плазмы;
- системы вакуумирования, газообеспечения, фильтрации и кондиционирования воздуха.

В докладе представлен обзор текущего состояния дел по разработки лазерного комплекса.

КАДЫРОВ А.Э., КУЗНЕЦОВ А.П., МИХАЙЛОК А.В., ЦАРЁВ М.С., КРАВЧЕНКО В.В., ДЕШИН Д.А.
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ЭЛЬФ»

Рассмотрены особенности устройства и применения силового усилителя в составе лазерного комплекса «ЭЛЬФ». Изложены решения, применённые в конструкции, и ход работ по разработке и реализации системы.

A.E. KADYROV, A.P. KUZNETSOV, M.S. TSAREV, V.V. KRAVCHENKO, D.A. DESHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DESIGN OF THE POWER AMPLIFIER OF THE EXPERIMENTAL LASER FACILITY "ELF"

The features of the device and application of the laser amplifier as part of the laser facility "ELF" are considered. The solutions applied in the design and the progress of work on the development and implementation of the system are presented.

Основными задачами при создании лазерных установок мульти килоджоульного уровня энергии, в том числе и лазерного комплекса «ЭЛЬФ» являются: получение максимальной энергии и качества излучения, управляемость и стабильность параметров выходного излучения. Исходя из этого, одним из основных структурных элементов установки является система усиления лазерного излучения.

На основе анализа существующих решений в российских и зарубежных установках выработана собственная концепция решения (рис.1). Используется подход к организации оптической схемы усилительных каналов, ориентированный на сочетании преимуществ однопроходной и многопроходной схем усиления (уменьшенная модуляция поля и близкий к стопроцентному съем энергии). Для основного усилителя используются 7 модулей 2x2 канала с общей системой накачки на основе импульсных ламп.

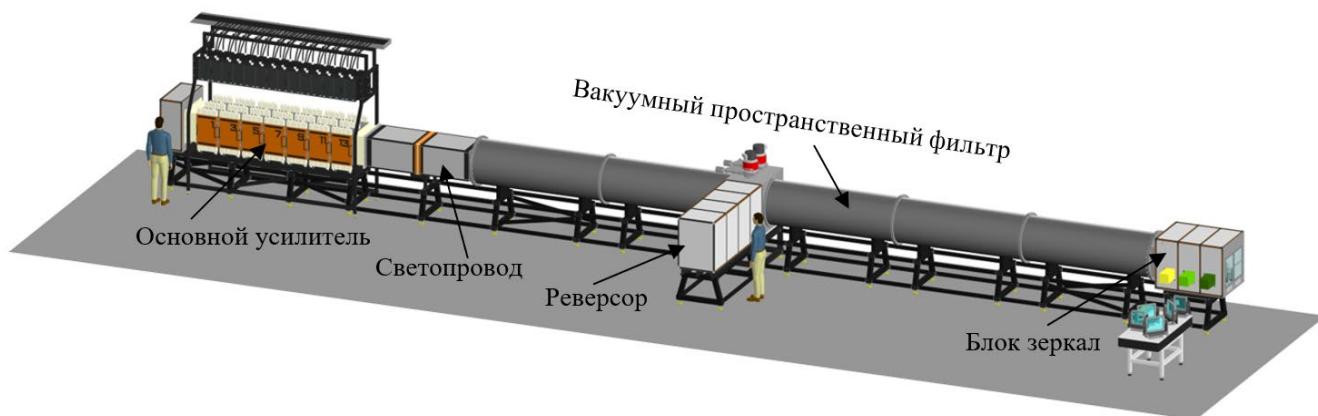


Рис. 1. Общий вид силового усилителя в лазерном зале

Важной особенностью является уменьшенный вдвое размер пучка на начальной стадии процесса 110x110 мм. Таким образом можно значительно увеличить активную длину (в режиме слабого сигнала, т.е. при малой плотности энергии излучения), так как в сечение одного активного элемента такой пучок помещается не один раз, а четыре. Для разворота пучка, с подачей его на другой канал (для реализации многопроходного усиления) используется реверсор оригинальной конструкции.

Проведены расчёты оптической схемы усиления, которая обеспечивает наилучшую трансляцию плоскости изображения от стартовой части на фокусирующий объектив мишени камеры. Разработана конструкция общего стапеля, обеспечивающего неизменность положения элементов системы, и их виброзащиту.

Разработана конструкция пространственного фильтра, представляющего собой вакуумный объём, внутри которого расположены диафрагменные узлы, на фланцах располагаются блоки линз транслирующих телескопов. Одной из отличительных черт разработанной конструкции является использование единого вакуумного объёма для всех проходов излучения, что позволяет упростить монтаж и удешевить производство. Общая длина пространственного фильтра 15 м. Для откачки используются два турбомолекулярных насоса на магнитных подвесах.

Разработана конструкция дистанционно юстируемых торцевых блоков зеркал, предназначенных для разворота пучка, и для передачи его в мишеннюю камеру. С левой стороны блок зеркал, модули усилителей и светопровод составляют единый герметичный объём, заполняемый сухим азотом.

^{1,2}П.А. КУЧУГОВ, ³С.И. ГЛАЗЫРИН, ¹С.Ю. ГУСЬКОВ, ¹Р.А. ЯХИН

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский пр., 53, 119991

²ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН»

³ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»

ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХМОЩНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИМЕНЕЛЬНО К ИССЛЕДОВАНИЯМ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ

В работе обсуждаются варианты генерации мощных ударных волн на интенсивностях лазерного излучения 10^{15} - 10^{16} Вт/см 2 и 10^{17} - 10^{19} Вт/см 2 , их использование для изучения термодинамических свойств веществ и динамики роста возмущений под действием гидродинамических неустойчивостей.

^{1,2}P.A. KUCHUGOV, ³S.I. GLAZYRIN, ¹S.YU. GUS'KOV, ¹R.A. YAKHIN

¹P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125047, Russia

³Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow 127030, Russia

GENERATION OF POWERFUL SHOCK WAVES APPLIED TO STUDIES OF THE EQUATION OF STATE AND HYDRODYNAMIC INSTABILITIES

The paper discusses options for generating powerful shock waves at laser radiation intensities of 10^{15} - 10^{16} W/cm 2 and 10^{17} - 10^{19} W/cm 2 , their use for studying the thermodynamic properties of substances and the dynamics of perturbations growth under the hydrodynamic instabilities.

Изучение сжатой и нагретой плазмы представляет как практический интерес, заключающийся в реализации перспективных подходов в термоядерной энергетике, в частности, лазерного термоядерного синтеза, так и фундаментальный, связанный с расширением диапазонов исследования свойств веществ в экстремальных условиях. Ведущую роль в получении такой плазмы играют сильные ударные волны, обеспечивающие одновременно сжатие и нагрев вещества.

Наиболее распространёнными способами генерации ударных волн являются ударно-волновые эксперименты, в которых происходит столкновение разогнанного ударника с исследуемой мишенью, а также эксперименты с непосредственным прямым воздействием излучения на образец.

В рамках наносекундного канала установки ЭЛЬФ как в одном, так и в другом режиме, возможна генерация ударных волн с давлением до нескольких сотен Мбар, что соответствует скорости ударной волны до 300 км/с. В зависимости от конкретной постановки ударные волны с такими параметрами пригодны как для изучения свойств веществ, исследования динамики роста возмущений и способов подавления развития гидродинамических неустойчивостей.

Пикосекундный канал способен обеспечить генерацию быстрых электронов с плотностью потока энергии от 10^{16} до 10^{18} Вт/см 2 . Нагрев таким источником энергии даёт возможность генерации ударных волн с гигабарным уровнем давления. Основной задачей здесь является определение свойств пучка быстрых электронов в зависимости от параметров лазерного импульса и мишени, а также изучение термодинамического состояния вещества за фронтом сгенерированной ударной волны.

¹Р.А. ЯХИН, ¹Г.А. ВЕРГУНОВА, ¹С.Ю. ГУСЬКОВ, ¹Н.Н. ДЕМЧЕНКО, ^{1,2}П.А. КУЧУГОВ, ³С.И. ГЛАЗЫРИН, ^{1,3}А.В. БРАНТОВ, ^{1,3}В.Ю. БЫЧЕНКОВ

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский пр., 53, 119991

²ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН»

³ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»

ЛАЗЕР-ПЛАЗМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИМЕНЕТИЛЬНО К ЗАДАЧАМ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Обсуждаются направления исследований взаимодействия лазерного излучения с мишенями различного типа применительно к задачам лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) с использованием наносекундного лазерного канала установки ЭЛЬФ с длиной волн 1-ой и 2-ой гармоник излучения Nd-лазера в диапазоне интенсивностей 10^{13} - 10^{16} Вт/см².

¹R.A. YAKHIN, ¹G.A. VERGUNOVA, ¹S.YU. GUS'KOV, ¹N.N. DEMCHENKO, ^{1,2}P.A. KUCHUGOV, ³S.I. GLAZYRIN, ^{1,3}A.V. BRANTOV, ^{1,3}V.YU. BYCHENKOV

¹*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia*

²*Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125047, Russia*

³*Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow 127030, Russia*

LASER-PLASMA INTERACTION APPLIED TO THE TASKS OF LASER CONFINEMENT FUSION

The directions of research on the interaction of laser radiation with targets of various types are considered in relation to the tasks of laser confinement fusion (LCF) using a nanosecond channel of an ELF laser facility with a wavelength of the 1-st and 2-nd harmonics of Nd laser radiation in the intensity range of 10^{13} - 10^{16} W/cm².

Исследование воздействия на вещество мощного импульса лазерного излучения представляет собой важное направление физики высоких плотностей энергии. Актуальность темы обусловлена как фундаментальным характером процессов в плазме мишеней, так и важными приложениями, одним из которых, безусловно, является практическая реализация ЛТС.

Работа посвящена поиску направлений исследования взаимодействия лазерного излучения с мишенями различного типа применительно к задачам ЛТС с использованием наносекундного лазерного канала установки ЭЛЬФ, для которого будут доступны как 1-ая, так и 2-ая гармоники излучения Nd-лазера в диапазоне интенсивностей 10^{13} - 10^{16} Вт/см². Использование 1-ой гармоники позволит усилить многие лазер-плазменные эффекты, что упростит задачу их изучения, в то время как 2-ая гармоника является основной для строящейся Российской термоядерной установки, поэтому акцент необходимо будет сделать на ней. Планируемая установка ЭЛЬФ может стать полезным инструментом, позволяющим экспериментально проверить закладываемые в расчетах теоретические модели для отдельных физических процессов в горячей короне.

К наиболее важным направлениям исследований физики лазер-плазменного взаимодействия в области задач ЛТС, к которым будет уделено основное внимание, относятся:

Исследование механизмов поглощения энергии и генерации параметрических неустойчивостей в мишенях различного типа;

Исследование эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в пересекающихся лазерных пучках;

Исследование взаимодействия наносекундного импульса излучения с малоплотным микроразмерным пористым веществом лёгких химических элементов;

Генерация ударной волны за счёт переноса энергии быстрыми электронами, образованными при воздействии импульса излучения с интенсивностью 10^{15} - 10^{16} Вт/см² на твёрдую мишень применительно к методу зажигания мишени ЛТС сфокусированной ударной волной;

Исследование лазерно-индукционного рентгеновского излучения применительно к непрямому облучению мишеней ЛТС.

К.Ф. БУРДОНОВ¹, А.А. СОЛОВЬЕВ¹, Р.С. ЗЕМСКОВ¹, М.В. СТАРОДУБЦЕВ¹

1. Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ

В работе представлено описание экспериментального подхода к моделированию в лабораторных условиях масштабируемых астрофизических процессов [1,2].

Рассмотрены характерные конфигурации экспериментов по лабораторной астрофизике, описаны типичные диагностики, применяемые для измерения параметров генерируемой лазерной плазмы.

Представлен обзор экспериментальных исследований, направленных на лабораторное моделирование динамики аккрецирующих звездных объектов, включающих испускание протозвездой джета, выпадение на поверхность звезды аккрецирующего вещества, развитие неустойчивости Релея-Тейлора в области радиуса усечения аккреционного диска. Рассмотрены работы, посвященные моделированию в лабораторных условиях намагниченных бесстолкновительных ударных волн, релевантных астрофизическим, а также работы по исследованию филаментационных неустойчивостей в неравновесной космической плазме, и эксперименты, посвященные магнитному пересоединению.

Выдвинут ряд предложений по перспективным экспериментальным исследованиям в области лабораторной астрофизики, которые могут быть реализованы на создаваемом в МИФИ лазерном комплексе ЭЛЬФ.

Поддержано Министерством науки и высшего образования РФ (проект № FFUF-2024-0038)

K.F. BURDONOV¹, A.A. SOLOVIEV¹, R.S. ZEMSKOV¹ M.V. STARODUBTSEV¹

1. Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russia

LABORATORY MODELING OF ASTROPHYSICAL OBJECTS AND PHENOMENA

This work presents a description of an experimental approach to laboratory modeling of scalable astrophysical processes [1,2].

Typical configurations of laboratory astrophysics experiments are considered, typical diagnostics used to measure the parameters of laser generated plasma are described.

A review of experimental studies aimed at laboratory modeling of the plasma dynamics of accreting young stellar objects is presented, including the ejection of a jet by a protostar, the fall of accreting matter onto the surface of a star, and the development of Rayleigh-Taylor instability in the region of the truncation radius of the accretion disk. The works devoted to laboratory modeling of astrophysically relevant magnetized collisionless shocks, as well as studies of filamentation instabilities in nonequilibrium cosmic plasma, and experiments devoted to magnetic reconnection are considered.

A number of proposals have been put forward for promising experimental research in the field of laboratory astrophysics, which can be implemented at the ELF laser facility being created at MEPhI.

Supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FFUF-2024-0038)

Список литературы

1. D.D. Ryutov // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25(10), 100501.
2. H. Takabe and Y. Kuramitsu // High Power Laser Science and Engineering. 2021. Vol. 9, e49.

**Н.Г. БОРИСЕНКО, А.А. АКУНЕЦ, А.И. ГРОМОВ, В.М. ДОРОГОТОВЦЕВ, В.С. ЛИТВИН, А.В.
ПАСТУХОВ, В.Г. ПИМЕНОВ*, С.М. ТОЛОКОННИКОВ**

ФГБУН Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

** ФГБУН Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук, Москва, Россия*

МИШЕНИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА НА ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ЭЛЬФ

Представляются для обсуждения предложения подготовительной фазы работ по возможным мишеням для ближайших экспериментов в программе ЭЛЬФ.

**N.G. BORISENKO, A.A. AKUNETS, A.I. GROMOV, V.M. DOROGOTOVTSEV, V.S.LITVIN, A.V.
PASTUKHOV, V.G. PIMENOV*, S.M. TOLOKONNIKOV**

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

N.D.Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

TARGETS FOR EXTREME MATTER PHYSICS STUDY WITH THE LASER ELF

The preparation phase for the targets of the ELF laser experiments is proposed for the discussion.

В 60ти годах от возникновения идеи ЛТС – лазерного термоядерного синтеза, какова сейчас миссия мишеней? Она в разнообразии исследований по физике на каждом построенном лазере с конкретными параметрами, ресурсом, ограничениями. Минимальное время от гипотезы до эксперимента делает привлекательным научное направление «мишени для ЛТС».

Веер разработок Лаборатории термоядерных мишеней (современное название коллектива) в академическом институте уже 50 лет участвует с мишенями в проектах по стране и миру, обеспечивает задел для национальной программы по ЛТС с фабрикой мишеней авторства ФИАН и дает возможности плодотворно экспериментировать на уже введенных в эксплуатацию лазерах, ионных и мощных электрофизических установках.

Мишени работают и должны работать в экспериментах по их облучению, различного рода и масштаба, возможно быстрее анализироваться. Это отличный стимул и отрада для ученых, занятых мишенями: с одной стороны, увидеть новые явления в плазме, с другой стороны, получить обоснованные требования к следующим мишенным разработкам, зачастую на порядок более легкие, чем в первоначальных расчетах.

Несмотря на микромасштаб (от санти- до нано), нововведения разрабатываются командами в содружестве многих исследовательских институтов страны. Научная широкого спектра деятельность, практика межведомственного взаимодействия, быстрота технологического поиска делает возможным конкуренцию с богатейшими странами и корпорациями, какие занимаются ЛТС. Ежегодно и у нас, и за рубежом, появляются новые методы изготовления [1-2] и исследований мишеней [5-6], конкуренция не ослабевает.

Спектр работ в ФИАНе по разработке микроизделий, методик и аппаратуры их изготовления и измерений дают новые результаты по физике экстремальных состояний вещества [3-4], создавая базу знаний, основу для дальнейших экспериментов с термоядерным и гибридным горением, для продвижения к реакторным технологиям, а также к новым фундаментальным и к полезному прикладным исследованиям. Ниже приведены часть новых работ с мишенями ЛТМ.

Список литературы

1. Pastukhov A. V. /Mat. Today Comm. – 2024. – T. 39. – C. 109043.
2. Pastukhov A.V., Pervakov K.S., et al, J Appl Polymer Sci. 2022. V.139. Issue 41. e52997.
3. Gyrdymov M., et al. Sci Reports. – 2024. – T. 14. – №. 1. – C. 14785.
4. Jakub Cikhardt et al. /Mat.and Rad at Extremes. – 2024. – T. 9. – №. 2. DOI: 10.1063/5.0181119
5. Artyukov I. A., Borisenko N et al. /Photonics. – 2023. – T. 10. – №. 8. – C.875.
6. Борисенко Н.Г., Артюков И.А и др., Об опыте микротомографии наноструктурированных объектов./Сб. мат. Конференции 2023. IV Всерос. науч.конф. «Практическая микротомография», РХЦ Гос. Эрмитажа «Старая деревня» г. СПб, под ред. С.В. Кошеверской. Стр.10-16. ISBN 978-5-4386-2337-3 Гос. Эрмитаж, 2023 (e-library).

С.Г. БОЧКАРЕВ^{1,2}, А.В. БРАНТОВ^{1,2}, В.Ю. БЫЧЕНКОВ^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Центр фундаментальных и прикладных исследований, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

ЗАДАЧИ ПО СТОХАСТИЧЕСКОМУ НАГРЕВУ И УСКОРЕНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ/ИОНОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ПЛОТНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ, МИШЕНЕЙ С ПРЕПЛАЗМОЙ И СТРУКТУРИРОВАННЫХ МИШЕНЕЙ

В докладе рассматриваются задачи по стохастическому нагреву и ускорению заряженных частиц с использованием пикосекундного импульса лазерной системы килоджоульного уровня «ЭЛЬФ». Экспериментальная проверка механизма стохастического ускорения электронов в сложных лазер-плазменных полях могла бы послужить практически важной задачей в рамках программ лабораторной астрофизики, физики высоких плотностей энергии и экстремального состояния вещества, а также для создания источников вторичного ЭМИ и лазерного инициирования ядерных превращений на лазерном комплексе «ЭЛЬФ».

S.G. BOCHKAREV^{1,2} A.V. BRANTOV and V.YU. BYCHENKOV^{1,2}

¹P.N. Lebedev Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

²Center for Fundamental and Applied Research, Dukhov Research Institute of Automatics ROSATOM, Moscow, Russia

PROBLEMS OF STOCHASTIC HEATING AND ACCELERATION OF ELECTRONS/IONS IN LASER IRRADIATION OF DENSE GAS JETS, TARGETS WITH PREPLASMAS AND STRUCTURED TARGETS

The report discusses problems of stochastic heating and acceleration of charged particles using a picosecond pulse from the ELF kilojoule laser system. Experimental verification of the mechanism of stochastic acceleration of electrons in complex laser-plasma fields could serve as a practically important task within the framework of programs in laboratory astrophysics, High-Energy-Density Physics and Extreme States of Matter, as well as for creating sources of secondary electro-magnetic radiation and laser initiation of nuclear transformations on a laser complex "ELF (Experimental Laser Facility)".

Воздействие мощного релятивистско-интенсивного лазерного импульса на мишени низкой средней плотности (плотные газовые струи, преплазма, структурированные мишени) может приводить к стохастическому нагреву/ускорению электронов. Стохастический характер ускорения электронов определяется локальной неустойчивостью траекторий частиц в сложных ЭМ полях, индуцированных мощным лазерным импульсом в плазменной короне плотной мишени. Экспериментальная проверка механизма стохастического ускорения электронов в сложных лазер-плазменных полях могла бы послужить практически важной задачей на лазерном комплексе «ЭЛЬФ».

В докладе обсуждается возможность использования нескольких типов мишеней для возможных экспериментов с интенсивным пс-лазерным импульсом на лазерной установке «ЭЛЬФ»: мишени с управляемой преплазмой (1), микроструктурированные мишени, включая микрокластерные, требующие высокого контраста лазерного импульса (2), квазиоднородная среда окколокритической плотности (3), создаваемая, в том числе, и за счет гомогенизации наноструктурированных мишеней при облучении лазерным импульсом с умеренным контрастом или разрушения тонких фольг. Также рассматривается реализация нагрева мишеней несколькими пс импульсами, которые могут быть получены разделением основного импульса «ЭЛЬФ». Во всех случаях стохастический нагрев является центральным механизмом среди бесстолкновительных механизмов нагрева электронов и именно он, по-видимому, отвечает за формирования супермондермоторной группы электронов.

Среди практически важных задач применения предлагаемой схемы генерации сильноточных пучков отметим получение распределенных по энергии электронных пучков для проведения радиационных испытаний космической электроники в лаборатории, а также для моделирования астрофизических потоков электронов. Сюда также относится задача получения эффективного тормозного источника позитронов. Возможность практически полного поглощения лазерного излучения в структурированных средах открывает путь для получения в эксперименте коротких импульсов рентгеновского тормозного и характеристического излучения с длительностью, не превосходящей нескольких пс. Такие источники востребованы для измерения процессов с высоким пространственным и временным разрешением. Например, они подойдут для измерения быстропротекающих процессов, и в частности, для диагностики ударных волн.

Рассмотренные мишени, облучаемые мощным пс импульсом лазерного комплекса «ЭЛЬФ», могут стать эффективным источником лазерно-ускоренных протонов и гамма-излучения для радиационно-ядерных приложений, в том числе для создания источника радиоизотопов, включая медицинские, а также для задач по получению и изучению вещества в экстремальных состояниях.

Н.Е. АНДРЕЕВ^{1,2}, О.Н. РОЗМЕЙ³

1 Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

2 Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет), Долгопрудный, Московская область, Россия

3 Гёте Университет, Франкфурт, Германия

ЗАДАЧИ ПО ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ СУПЕР-ПОНДЕРОМОТОРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ - ОСНОВА СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЧАСТИЦ

Рассмотрены различные процессы лазерного ускорения электронов, начиная с кильватерного ускорения в режиме самомодуляции лазерного импульса. Обсуждается более эффективная концепция создания вторичных источников излучения и высокоэнергетических частиц на основе генерации релятивистских электронов в режиме прямого лазерного ускорения в протяженной плазме околоскритической плотности, которая была подтверждена в экспериментах

N. E. ANDREEV^{1,2}, O.N. ROSMEJ³

1 Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

2 Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi, Moscow region, Russia

3 Goethe University, Frankfurt, Germany

PROBLEMS OF GENERATION OF HIGH-CURRENT BEAMS OF SUPER-PONDERMOTOR ELECTRONS IN THE DIRECT LASER ACCELERATION MODE - THE BASIS FOR CREATION OF LASER SOURCES OF RADIATION AND PARTICLES

Various processes of laser acceleration of electrons are considered, starting with wake acceleration in the mode of self-modulation of the laser pulse. A more effective concept of creating secondary sources of radiation and high-energy particles based on the generation of relativistic electrons in the mode of direct laser acceleration in an extended plasma of near-critical density, which was confirmed in experiments, is discussed.

Эксперименты и численное моделирование продемонстрировали высокоэффективное преобразование энергии лазера в энергию МэВ-частиц и излучения при использовании низкоплотных мишеней из пены [1-9]. Эти результаты открывают путь к созданию на базе лазерного комплекса ЭЛЬФ широкого круга вторичных лазерных источников с рекордными характеристиками на основе низкоплотных мишеней из пеноматериалов. Среди таких источников, которые найдут применение, как в фундаментальных исследованиях, так и в решении различных практически важных задач следует отметить

- 1 сильноточные пучки супер-пондермоторных электронов, генерируемые в режиме прямого лазерного ускорения;
- 2 яркие источники бетатронного излучения;
- 3 ультра-яркие источники тормозного гамма-излучения в МэВ диапазоне энергий;
- 4 источники нейтронов и изотопов в фотоядерных реакциях;
- 5 интенсивные источники высокоэнергетических протонных пучков;
- 6 высокоинтенсивные ударные волны и фазовые переходы в веществе под их воздействием.

Архитектура лазерного комплекса ЭЛЬФ, позволяющая одновременно использовать синхронизованные (с заданной задержкой) импульсы наносекундной и суб-пикосекундной длительности, является оптимальной для реализации всех перечисленных выше задач.

Список литературы

1. L.P. Pugachev, N.E. Andreev, P.R. Levashov, O.N. Rosmej, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, V. 829. P. 88–93 (2016).
2. N.E. Andreev, V.S. Popov, O.N. Rosmej, et al. Quantum Electronics, 51, 1019–1025 (2021).
3. O.N. Rosmej, N.E. Andreev, S. Zaehler, et al., New J. Phys. V. 21, P. 043044 (2019).
4. O.N. Rosmej, M. Gyrdymov, M.M. Günther [et al.]. // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2020. oct. — Vol. 62, no. 11. — P. 115024.
5. M.M. Günther, O.N. Rosmej, P. Tavana [et al.]. // Nature Communications. — 2022. Jan. — Vol. 13, no. 1. — P. 170. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27694-7>.
6. P. Tavana, N. Bukharskii, M. Gyrdymov [et al.]. // Front. Phys. Sec. Nuclear Physics. — 2023.
7. Andreev N.E., Umarov I.R., Popov V.S. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2023. Vol. 50, Suppl. 7, pp. S797–S805.
8. J. Cikhardt, M. Gyrdymov, S. Zähler [et al.]. // Matter and Radiation at Extremes. — 2024. 02. — Vol. 9, no. 2. — P. 027201.
9. Mikhail Gyrdymov, Jakub Cikhardt, Parysatis Tavana [et al.]. // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14, no. 1. — P. 14785.