

УДК 621.385

## РАЗРАБОТКА ФОТОИНЖЕКТОРНОГО УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В ИПФ РАН: СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*А. А. Вихарев\**, *А. Л. Вихарев*, *Е. И. Гачева*, *О. А. Иванов*, *С. В. Кузиков*, *Д. С. Макаров*,  
*М. А. Мартыянов*, *С. Ю. Миронов*, *Н. Ю. Песков*, *А. К. Потемкин*, *М. Ю. Третьяков*,  
*А. П. Шкаев*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Статья посвящена исследованиям, проводимым в ИПФ РАН и направленным на создание ускорительного фотоинжекторного комплекса, который обеспечивает формирование электронных сгустков с зарядом до 100 пКл при энергии частиц  $3\div 5$  МэВ. Описаны ключевые элементы комплекса: ускорительный резонатор, запитываемый клистроном с рабочей частотой 2,45 ГГц и мощностью 5 МВт, фотокатод на основе алмазных плёнок, мощный ультрафиолетовый лазер и система синхронизации лазерных импульсов с фазой ускоряющего сверхвысокочастотного (СВЧ) поля. Приведены конструктивные параметры компонентов комплекса, обсуждается состояние исследований, связанных с его реализацией.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время фотоинжекторные комплексы являются объектом интенсивных исследований и разработок, на данный момент в мире созданы и успешно функционируют десятки подобных установок. Интерес к ним связан, прежде всего, с задачами ускорения частиц до высоких энергий и их использованием в составе драйверов в лазерах на свободных электронах, работающих в диапазонах от терагерцового до рентгеновского, а также с другими многочисленными фундаментальными приложениями, в том числе сверхбыстрыми электронными дифракцией и микроскопией и др. Со времени первой экспериментальной демонстрации фотоинжекторов [1] достигнут существенный прогресс практически по всем их параметрам, включая энергию частиц, ток, яркость и частоту следования электронных сгустков. В современных сверхвысокочастотных (СВЧ) фотоинжекторах [2–5] мощные лазерные импульсы обеспечивают фотоэмиссию электронных сгустков из фотокатода с зарядом до сотен нанокulon и длительностью от фемтосекунд до десятков пикосекунд. При соответствующей синхронизации лазерного импульса и запитывающего СВЧ источника эмитированные с фотокатода электроны ускоряются в СВЧ поле резонатора, при пролёте которого они способны набрать энергию до нескольких мегаэлектронвольт (полученные электронные сгустки могут быть далее ускорены и до более высоких энергий). Исследования фотоинжекторных комплексов активно продолжаются в направлении создания новых, более совершенных схем с целью получения больших пиковых и средних значений тока и более низких значений эмиттансов сгустков и разброса частиц по энергиям.

Разрабатываемый в ИПФ РАН фотоинжекторный комплекс имеет классическую компоновку и состоит из несколько подсистем: 1) ускорительного резонатора, который запитывается микроволновым излучением от высокостабильного генератора, усиленным до мультимегаваттного уровня мощности, и обеспечивает формирование интенсивного электронного сгустка; 2) фотокатода, размещенного непосредственно в данном резонаторе и обеспечивающего эффективную

---

\* alvikharev@appl.sci-nnov.ru

эмиссию электронов; 3) ультрафиолетового лазера, вызывающего фотоэмиссию электронов с катода и 4) системы синхронизации лазерных импульсов с фазой ускоряющего поля СВЧ излучения. В данной статье приведены конструктивные параметры компонентов комплекса и обсуждается состояние исследований, связанных с его реализацией.

## 1. РЕЗОНАТОРНАЯ СЕКЦИЯ СВЧ УСКОРЕНИЯ СГУСТКОВ

В качестве источника СВЧ излучения для ускоряющего резонатора предполагается использовать компактный усилительный клистрон КИУ-111 производства НПП «Торий» [6] с частотой 2,45 ГГц, выходной мощностью 5 МВт при коэффициенте полезного действия (КПД) 44 %, длительностью импульса 7 мкс и коэффициентом усиления до 50 дБ. Резонатор состоит из двух связанных ячеек, длина первой ячейки составляет четверть длины волны, длина второй — половину длины волны (рис. 1а, б). Расчёт и моделирование резонатора проводилось с использованием оригинальных программ и трёхмерного коммерческого кода HFSS [7, 8]. В разработанной схеме излучение от клистрона транспортируется волноводным трактом на основе стандартных прямоугольных волноводов и вводится в коаксиальный волновод на ТЕМ-волне (см. рис. 1в), которая питает ускоряющий резонатор с длиной 117,4 мм. В качестве рабочей выбрана так называемая  $\pi$ -мода, добротность которой согласно моделированию составляет около 13 500. Частота ближайшей 0-моды сдвинута от частоты рабочей моды более чем на 100 МГц. Расчётное отражение от резонаторной секции на рабочей частоте не превышает  $-35$  дБ.

Результаты моделирования процесса формирования сгустка в ускоряющем резонаторе представлены на рис. 2. В соответствии с ним при ускоряющем поле 70 МВ/м и фазе инжекции лазерного импульса около  $40^\circ$  от максимума СВЧ-поля на выходе фотоинжектора планируется получить электронные сгустки с энергией частиц около 3,5 МэВ, эмиттансом  $1,4 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$  и разбросом по энергиям не более 0,2 %. Заряд сгустков может достигать 100 пКл при использовании алмазного фотокатода и около 0,1 пКл с медного фотокатода, который планируется применять в начальных экспериментах по тестированию работы комплекса.

Энергетический разброс электронов в сгустке определяется несколькими фундаментальными факторами. Во-первых, электроны, эмитированные с катода, неизбежно имеют тепловой разброс по энергиям и разброс, определяемый шероховатостью поверхности катода. Оба фактора в случае тёплого медного катода оцениваются на уровне  $10 \div 15$  эВ. Во-вторых, несмотря на то, что длительность сгустка мала по сравнению с периодом высокочастотного поля, эмитированные с поверхности катода частицы сгустка инжектируются в слегка различающихся фазах ускоряющего поля и, соответственно, ускоряются неодинаково. Для уменьшения влияния этого фактора фаза инжекции середины сгустка оптимизировалась так, чтобы она соответствовала максимуму энергии, набираемой одним электроном. При этом длительность сгустка при сохранении его заряда желательно сокращать до тех пор, пока энергетический разброс вследствие кулоновского расталкивания не превысит разброс из-за разницы фаз инжекции. В нашем случае для длительности сгустка было выбрано компромиссное значение 10 пс. В-третьих, кулоновское расталкивание электронов не позволяет получить моноэнергетический пучок. В нашем случае этот фактор представляется основным при заряде сгустка около 100 пКл.

Схема, иллюстрирующая векторное распределение электрического поля рабочей моды, представлена на рис. 1а. Видно, что это распределение на части поверхности катода, облучаемой лазером, близко к равномерному, что является необходимым условием для получения минимального эмиттанса сгустка. При инжекции с катода низкоэнергетичный электронный сгусток начинает расширяться под действием собственных кулоновских полей, при этом эмиттанс растёт, как показано на рис. 2б. По мере увеличения энергии в поле ускоряющей моды электроны фокусиру-

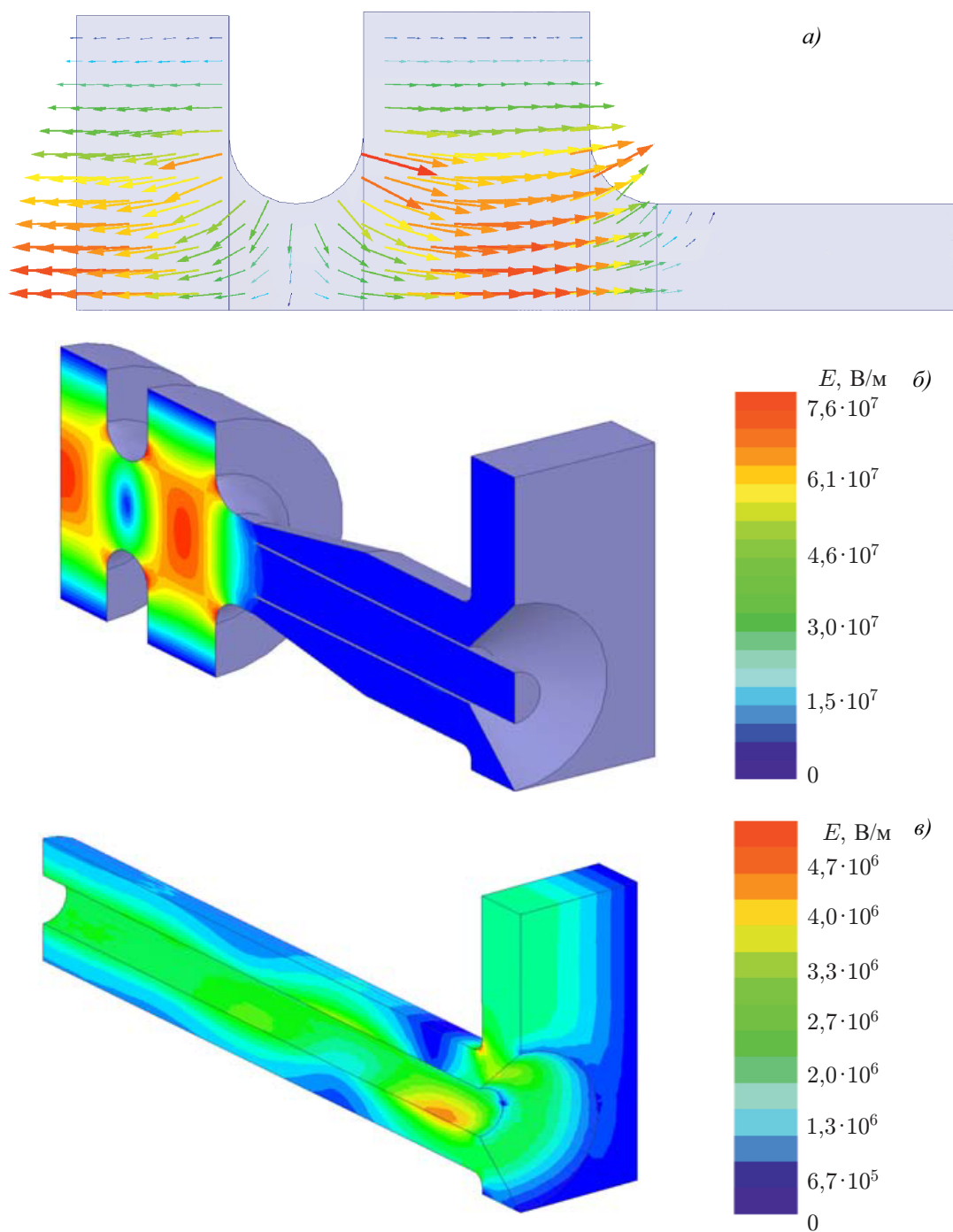


Рис. 1. (а) Схема резонатора на основе двух ускоряющих ячеек и структура поля его рабочей  $\pi$ -моды, а также результаты трёхмерного HFSS-моделирования структуры полей в ускоряющих ячейках (б) и коаксиальном вводе мощности (в)

ются магнитным полем соленоида, которое плавно нарастает от нуля на катоде до максимума на выходе ускоряющего резонатора. Фокусировка магнитным полем препятствует поперечному разлёту электронов так, что эмиттанс сгустка, достигнув некоторого максимума, уменьшается (см. рис. 2б). Этот процесс может быть описан в терминах компенсации коррелированного углового разброса частиц [9].

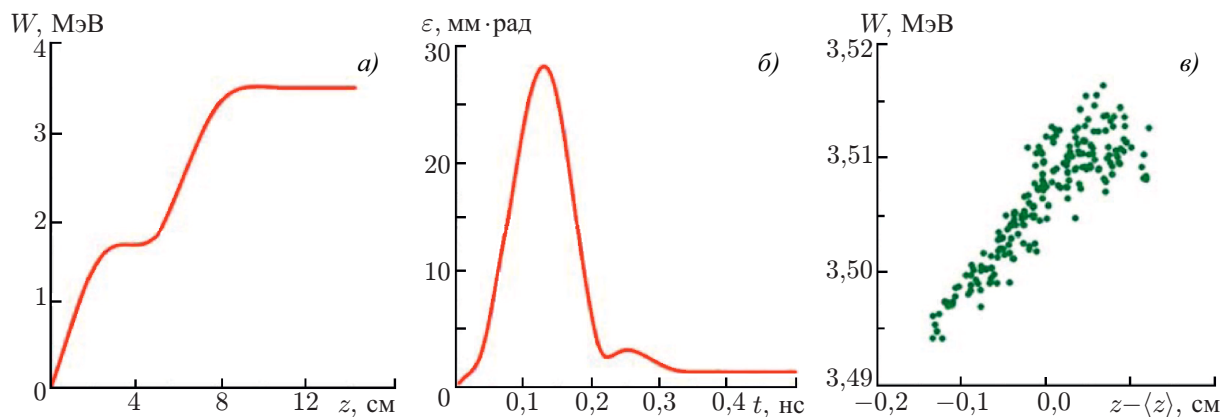


Рис. 2 Результаты моделирования СВЧ пушки: зависимость средней энергии частиц в сгустке от длины резонатора (а), эволюция нормализованного эмиттansa сгустка (б) и распределение частиц по энергиям в сгустке на выходе пушки (в)

Поскольку фаза выходного сигнала клистрона, от стабильности которой зависит накачка ускоряющего резонатора, может флуктуировать при изменении питающего напряжения на катоде, возникают требования на стабильность напряжения. Моделирование показывает, что для эффективной накачки СВЧ резонатора фотоинжектора с указанной добротностью неравномерность импульса напряжения питания клистрона не должна превышать 5 %. При этом необходим участок напряжения с длительностью не менее 2 мкс, на котором его изменение не превышает 1 % при стабильности параметров по времени от импульса к импульсу не хуже 1 %. На основе выполненных расчётов разработан и создан модулятор напряжения клистрона КИУ-111 55 кВ / 250 А / 7 мкс / 10 Гц, удовлетворяющий данным требованиям. Отметим для сравнения, что сетевая мощность питания клистрона (с учётом цепи накала катода) при этом составляет около 2 кВт, а мощность системы питания лазерного комплекса, работающего с частотой повторения 100 Гц, — около 4 кВт. В настоящее время тестирование работы клистрона проведено в моделирующем режиме (в отсутствие нагрузки при уровне выходной мощности 1 кВт, см. рис. 3).

Для транспортировки СВЧ излучения от клистрона в резонатор разработана линия передачи, состоящая из участка, заполненного азотом под избыточным давлением около 1 атм. (что необходимо для эксплуатации окна клистрона), и участка с вакуумной откачкой, отделённого от остального объёма линии барьерным окном на основе толстого кварцевого диска, а также ответвителей прямого и отражённого сигналов для диагностики работы клистрона и резонатора. В стадии завершения изготовления находятся секция напуска газа и секция откачки, выполненная на основе волновода с перфорированной стенкой. Важным элементом линии является ферритовый вентиль на 350 Вт непрерывной / 5 МВт пиковой мощности с изоляцией –20 дБ, который должен обеспечить работу клистрона при наличии отражения от резонатора фотоинжектора в начале импульса запитки, а также в аварийных режимах, например при пробое в ускоряющем резонаторе. В настоящее время завершается сборка ускорительного резонатора и линии передачи, начато холодное тестирование комплекса и отладка работы клистрона на высоком (мультимегаваттном) уровне мощности.

## 2. ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ФОРМИРОВАНИЯ СГУСТКОВ

Для облучения катода предполагается использовать создаваемый в ИПФ РАН лазерный комплекс с возможностью управления спектрально-временными параметрами лазерных импульсов

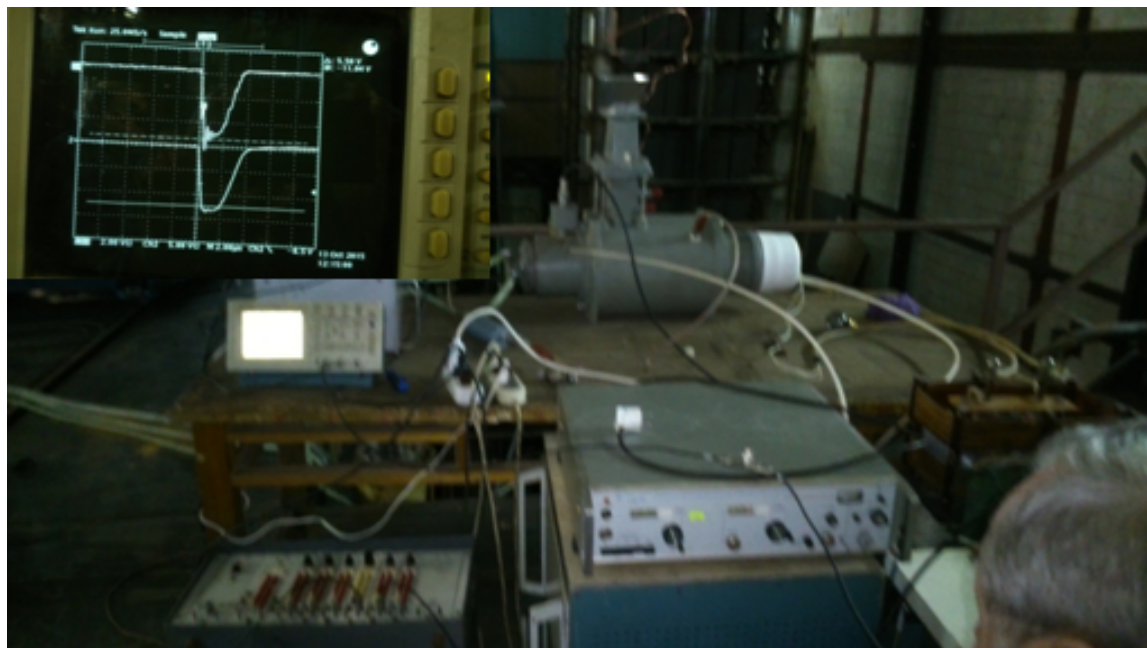


Рис. 3. Результаты экспериментов по проверке работоспособности клистрона КИУ-111. На осциллографе видны осциллограммы импульсов напряжения и СВЧ излучения

[10–12]. Лазерная система состоит из волоконной стартовой части, трёх твёрдотельных усилителей, формирователей одномерной и трёхмерной структур распределения интенсивности, стадии генерации второй и четвёртой гармоники, а также системы диагностики лазерных импульсов инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов. Принципиальная схема лазера представлена на рис. 4.

Стартовая часть имеет два выходных канала (рабочий и диагностический) и включает в себя волоконный задающий генератор (частота следования импульсов 47,6 МГц, их длительность примерно 250 фс, центральная длина волны 1 034 нм), оптический стретчер на основе chirpiрующей волоконной решётки Брэгга, систему предварительного прореживания импульсов и формирования цугов, линейку волоконных усилителей с диаметром активного волокна от 7 до 14 мкм, допированного ионами  $\text{Yb}^{+3}$ .

В рабочем канале волоконной части лазера с целью управления временной формой лазерных импульсов встроен формирователь спектральной фазы, который можно использовать и для управления спектральной амплитудой [10]. Излучение из волокна выводится наружу и коллимируется, затем проходит формирователь, возвращается строго назад и через волоконный циркулятор (развязку Фарадея) попадает обратно в волокно, где дополнительно усиливается. Формирователь представляет собой оптический компрессор с нулевой частотной дисперсией в рабочей полосе, у которого в плоскости Фурье расположен пространственный модулятор света SLM (Spatial Light Modulator) производства компании Hamamatsu.

Использование формирователя даёт возможность управлять формой спектрального распределения интенсивности широкополосных линейно chirpiрованных лазерных импульсов — спектронов. Для них распределение интенсивности спектра соответствует распределению интенсивности во времени, т.е. управление спектром позволяет непосредственно управлять временной формой импульса. С использованием формирователя уже были получены лазерные импульсы с прямоугольным [10] и линейно нарастающим (треугольным) распределением интенсивности во времени [12] в инфракрасной области спектра. На выходе волоконной части лазера длительность



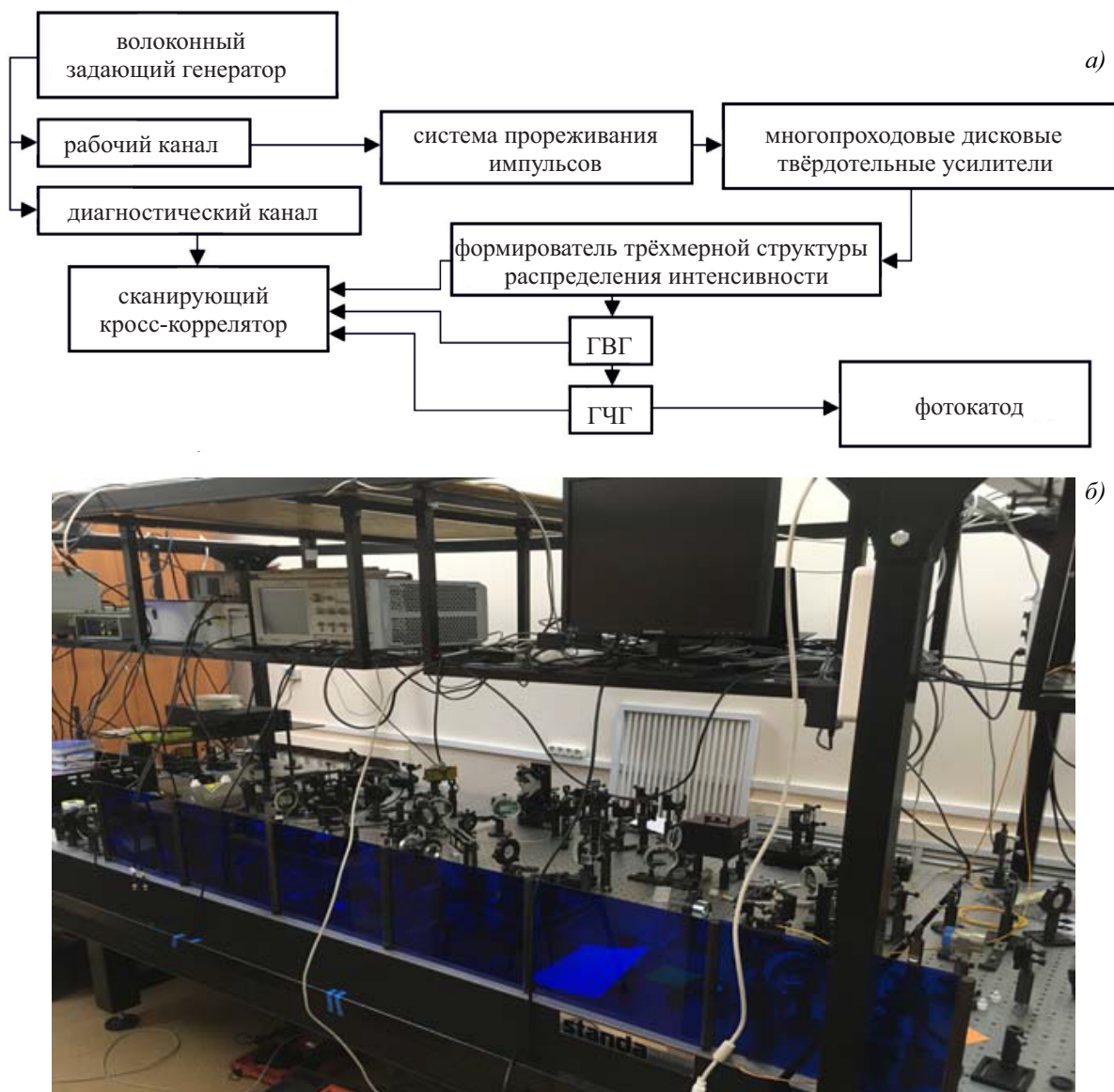


Рис. 4. (а) Принципиальная схема и (б) фотография лазерного комплекса для облучения фотокатода. Здесь ГВГ — генератор второй гармоники, ГЧГ — генератор четвёртой гармоники

импульсов рабочего и диагностического каналов составляет примерно 200 пс. С использованием оптического компрессора импульсы диагностического канала сжимаются до своего предела Фурье 250 фс и направляются в сканирующий кросс-коррелятор, где используются для диагностики трёхмерной формы профилированных импульсов инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов (см. рис. 4).

Излучение с волоконного выхода рабочего канала направляется в дополнительную систему прореживания, созданную на основе ячейки Поккельса. Эта система позволяет сформировать окончательный пуг импульсов (или, если требуется, одиночный импульс) для последующего усиления, преобразования в ультрафиолетовый диапазон и генерации электронных сгустков с поверхности катода фотоинжектора электронов. Для увеличения энергии лазерных импульсов используются три многопроходовых дисковых усилителя с диодной накачкой мощностью 300 Вт /

1 кВт и центральной длиной волны 940 нм. В качестве активных элементов применяются кристаллы Yb:KGW толщиной 3 мм. После усилителей расположена стадия формирования трёхмерной структуры лазерных импульсов, которая состоит из оптического компрессора для управления длительностью в диапазоне  $0,25 \div 200$  пс, а также объёмной чирпирующей решётки Брэгга, которая может быть задействована для создания лазерных импульсов с трёхмерным эллипсоидальным распределением интенсивности [10]. Далее будет расположена стадия генерации второй и четвёртой гармоник, где предполагается преобразовать излучение из инфракрасной области спектра в ультрафиолетовый диапазон, а затем линзовая линия передачи для направления ультрафиолетового излучения на поверхность катода.

### 3. СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ

Для запитывания клистрона используется двухступенчатая система из маломощного СВЧ источника и предусилителя (рис. 5), который при входной непрерывной мощности  $0,5 \div 3$  мВт обеспечивает выходную мощность до 200 Вт при длительности импульсов до 7 мкс и частоте следования до 100 Гц.

Рабочий диапазон клистрона достаточно узок:  $2445 \pm 5$  МГц. Частота излучения стабилизированного СВЧ источника должна попадать в этот диапазон и оставаться стабильной на протяжении долгого времени. В качестве такого источника — генератора, управляемого напряжением (ГУН), — используется модуль ZX95-2490-S производителя Mini Circuits, работающий в диапазоне  $2\,290 \div 2\,490$  МГц с мощностью выходного сигнала + 8 дБм. Генератор, управляемый напряжением, позволяет использовать фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) по опорной частоте любого источника с хорошими спектральными характеристиками, при этом опорная частота может отличаться от задаваемой в десятки раз. Системы ФАПЧ успешно применяются для синхронизации СВЧ источников, работающих на частотах вплоть до сотен гигагерц и используемых в системах прецизионных лабораторных спектроскопических измерений [13].

Стабилизация частоты осуществляется системой ФАПЧ на основе микросхемы PE3336 производителя Peregrine Semiconductor с максимальной входной частотой 3 ГГц. Микросхема содержит необходимые делители частоты в канале сигнала и опорной частоты, а также внутренний частотно-фазовый детектор (ЧФД) с максимальной частотой входных сигналов 20 МГц и систему индикации режима синхронизации (аналогичный элемент успешно использовался в радиометрическом озонметре [14]).

Опорный сигнал формируется из импульсной последовательности, генерируемой фотоприёмником под действием ответвлённого на него излучения фемтосекундного лазера. Под действием импульсов лазера фотоприёмник генерирует короткие (не длиннее десятков наносекунд) импульсы тока с частотой следования импульсов лазерного излучения, затем эти импульсы преобразуются в импульсы вдвое меньшей частоты со скважностью около 50 % (т. е. меандр), пригодные для работы цифровых логических микросхем. Отфильтрованная основная гармоника этого сигнала после необходимого усиления подаётся на двухполупериодный удвоитель частоты. В результате фильтрации и усиления основной гармоники сигнала получается синусоидальный сигнал, уровень которого не зависит от изменения частоты следования импульсов лазера и параметров цепей, формирующих данные импульсы. Такой сигнал меньше подвержен дрожанию фазы («джиттеру»), которое может ухудшить фазовую стабильность сигнала синхронизируемого СВЧ источника. Точная настройка на необходимую частоту в рабочей полосе СВЧ усилителя мощности, используемого для запитки клистрона, осуществляется подбором делителей частоты в канале сигнала (взятого с направленного ответвителя на выходе ГУН) и опорной частоты, полученной из частоты следования импульсов фемтосекундного лазера. Успешная работа СВЧ

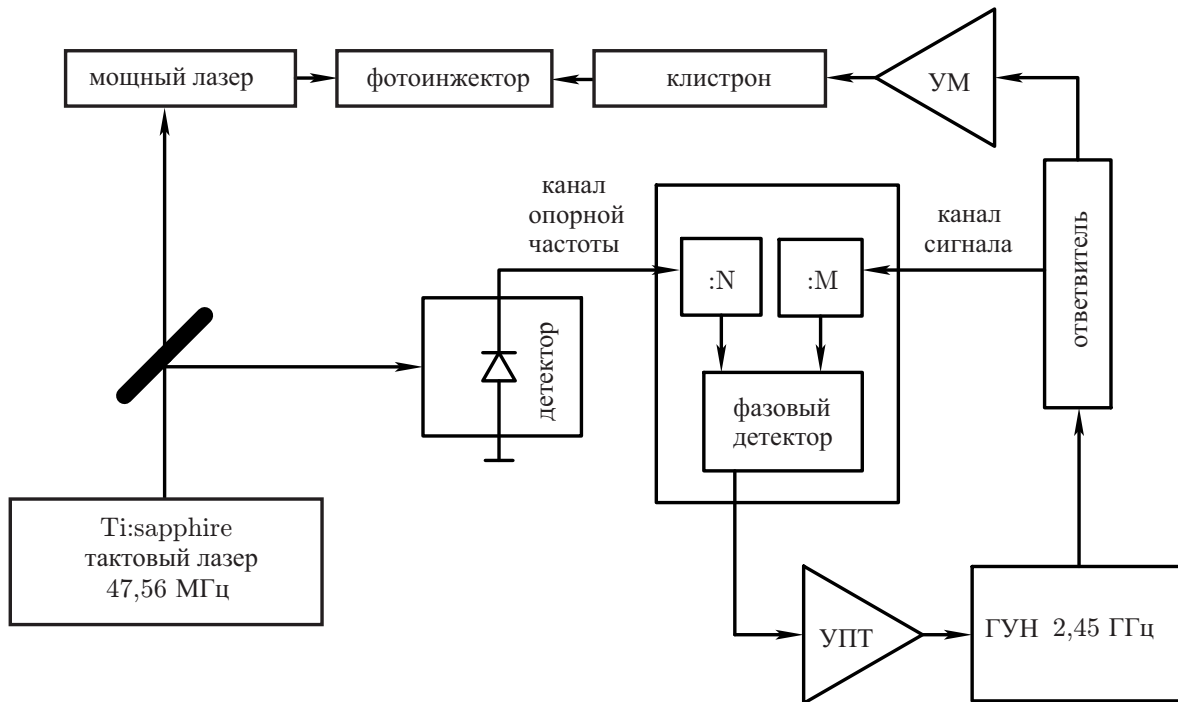


Рис. 5. Принципиальная схема системы синхронизации лазерных импульсов и ускоряющих СВЧ импульсов (здесь УПТ — усилитель постоянного тока, УМ — усилитель мощности)

источника для лабораторных измерений, стабилизированного по опорному сигналу фемтосекундного лазера, продемонстрирована в работе [15].

Для точной подстройки синхронизации лазерного и СВЧ излучения опорный сигнал ФАПЧ регулируется фазовращателем, устройство которого аналогично устройству фазового модулятора в работе [16]. Для обеспечения постоянного сдвига фазы сигнала вместо модулирующего переменного напряжения на второй вход компаратора подается постоянное напряжение, пропорциональное сдвигу фазы.

#### 4. ФОТОКАТОДЫ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК

Одним из перспективных материалов для фотокатодов, формирующих электронные пучки для современных ускорителей, в том числе основанных на фотоинжекторах, считается алмаз. Он обладает рядом уникальных свойств, таких как радиационная прочность, высокая теплопроводность и подвижность носителей заряда, возможность достижения отрицательного сродства к электронам и, следовательно, снижения работы выхода. При этом алмазный фотокатод не является критичным к уровню вакуума, легко очищается и восстанавливает эмиссионные свойства даже после пребывания на воздухе.

В разрабатываемом фотоинжекторном комплексе предполагается использовать алмазный фотокатод, состоящий из нескольких слоёв нанокристаллической алмазной плёнки с толщиной  $0,1 \div 2$  мкм, осаждаемой из газовой фазы в микроволновом плазмохимическом реакторе. Первый — фотопоглощающий — слой представляет собой сильно легированный азотом или фосфором алмаз с проводимостью n-типа. Применение легирования делает возможным использование для генерации фотоэлектронов более дешёвых длинноволновых лазеров (длина волны более 200 нм) оптического диапазона, обеспечивающих фотоионизацию с донорных уровней с энергией ак-



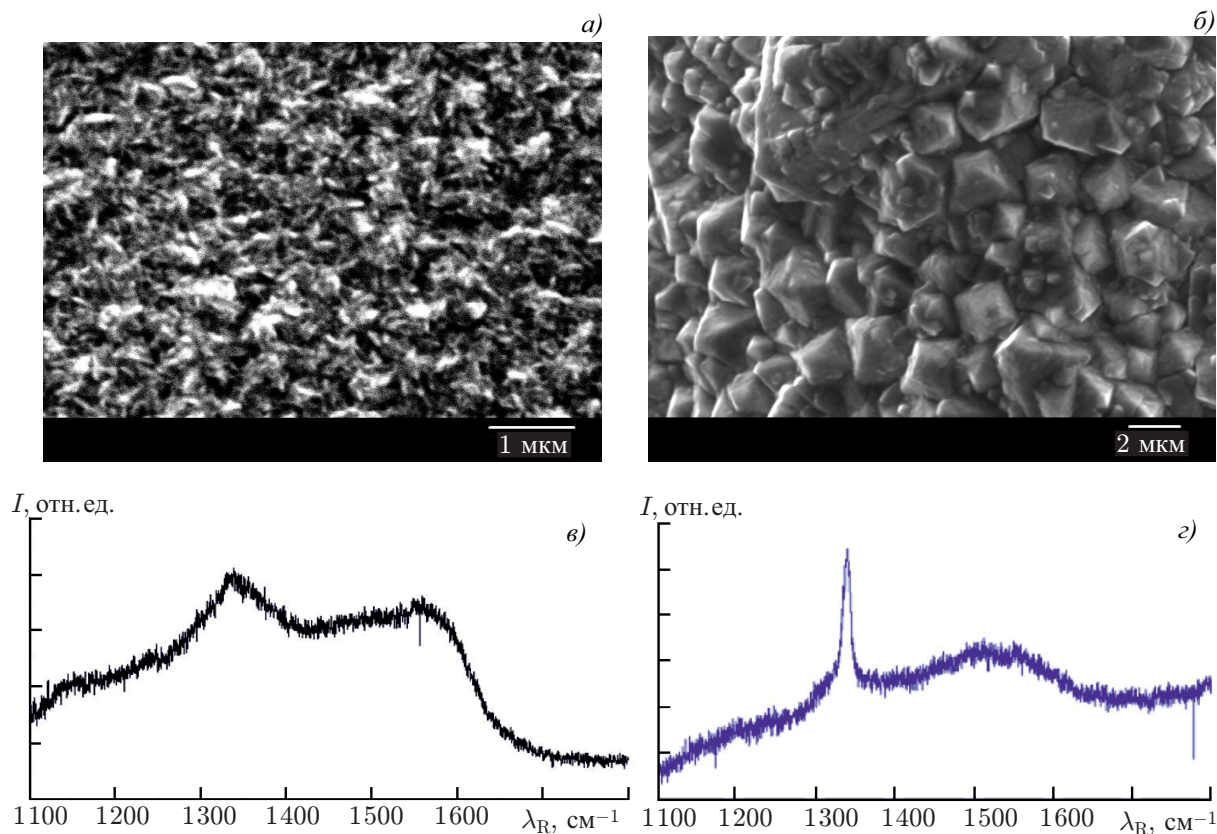


Рис. 6. Микрофотографии поверхности (сверху) и рамановский спектр  $\lambda_R$  (внизу) алмазной плёнки: после первой (а, в) и после второй (б, г) стадии осаждения на молибденовую подложку

тивации 1,6 эВ для азота и 0,6 эВ для фосфора. Оценки показывают, что при концентрации примеси азота  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  длина поглощения лазерного излучения с длиной волны 532 нм лежит в диапазоне  $0,1 \div 1 \text{ мкм}$  [17], а образующийся в результате фотопоглощения заряд может достигать 100 пКл. При этом наличие проводимости у алмазной плёнки препятствует накоплению заряда на поверхности фотокатода, что обеспечивает работу фотоинжектора при большой частоте повторения лазерных импульсов. Второй слой — слабо легированный алмаз — необходим для обеспечения дрейфа электронов и дырок к эмитирующей поверхности алмаза, в ходе которого за счёт столкновительного механизма осуществляется термализация электронов, снижающая энергетический разброс и эмиттанс электронного пучка. Третий слой — гидрогенизированный (H-terminated) слой, обладающий низкой или отрицательной работой выхода. При этом наличие второго и третьего слоёв слаболегированной нанокристаллической плёнки, обладающей проводимостью и высокой прозрачностью в ультрафиолетовой и видимой части спектра [18], не препятствует транспорту ионизирующего лазерного излучения со стороны этих слоёв к поглощающему слою.

В целом такой катод имеет большую квантовую эффективность и необходимый уровень электрической проводимости [19]. Эти свойства позволяют при облучении ультрафиолетовым излучением алмазной плёнки эффективно эмитировать большое количество электронов с поверхности и подводить туда новые электроны. В частности, при облучении излучением с длиной волны 254 нм экспериментально получена квантовая эффективность около  $10^{-3}$  для легированной азотом нанокристаллической алмазной плёнки с пассивированной водородом поверхностью [20]. Указанная квантовая эффективность значительно превышает известную квантовую эффективность

для монокристаллической меди ( $5 \cdot 10^{-5}$ ), которая в ряде случаев используется в качестве материала для фотокатода в ускорительных приложениях. В настоящее время проведены исследования осаждения многослойных нанокристаллических алмазных плёнок с различной степенью легирования (содержание примеси  $10^{18} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ), как азотом и фосфором (n-тип), так и бором (p-тип) на поверхность металлических подложек. На рис. 6 представлены полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа микрофотографии поверхности первого слоя, легированного азотом, и второго нелегированного слоя, последовательно осаждённых на молибденовую подложку, и их рамановские спектры. Спектр легированной азотом плёнки (рис. 6в) имеет два широких пика в окрестности  $1350 \text{ см}^{-1}$  и  $1580 \text{ см}^{-1}$ , свидетельствующих о том, что она содержит нанокристаллический алмаз и  $\text{sp}^2$ -гибридизированный углерод [21]. О высоком качестве нелегированной плёнки свидетельствует высокий пик в области  $1332 \text{ см}^{-1}$ , характерный для алмазной  $\text{sp}^3$ -фазы углерода и слабая полоса в окрестности  $1550 \text{ см}^{-1}$ , связанная с наличием  $\text{sp}^2$ -фазы (см. рис. 6г). В результате поверхность фотокатода представляет собой двухслойную структуру, состоящую из сильно легированной азотом поглощающей фотоны нанокристаллической плёнки с высокой проводимостью и нанесённой поверх неё тонкой алмазной плёнки.

Таким образом, исследования показали, что морфология плёнок, их проводимость и содержание доли неалмазной фазы в них сильно зависят от режима осаждения, что, в свою очередь, заметно влияет на их эмиссионные свойства. На следующем этапе предполагается испытание фотокатода на основе нанокристаллических алмазных плёнок в составе разрабатываемого фотоинжекторного комплекса.

Разработка фотоинжектора (разделы 1–3) ведётся при частичной поддержке РНФ (грант 20–12–00378). Исследование осаждения и характеристик нанокристаллических алмазных плёнок (раздел 4) выполнено в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035–2019–0003).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fraser J. S., Sheffield R. L., Gray E. R., Rodenz G. W. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1985. V. 32, No. 5. P. 1791–1793. <https://doi.org/10.1109/TNS.1985.4333725>
2. Rosenzweig J. B., Barov N., Colby E. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24, No. 2. P. 409–420. <https://doi.org/10.1109/27.510005>
3. Akre R., Dowell D., Emma P., et al. // Phys. Rev. ST Accel. and Beams. 2008. V. 11, No. 3. Art. no. 030703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.11.030703>
4. Stephan F., Boulware C. H., Krasilnikov M., et al. // Phys. Rev. ST-Accel. and Beams. 2010. V. 13, No. 2. Art. no. 020704. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.13.020704>
5. Power J. G. // AIP Conf. Procs. 2010. V. 1299. P. 20–28. <https://doi.org/10.1063/1.3520316>
6. <http://www.toriy.ru/ru/kly.html>
7. Kuzikov S. V., Shchelkunov S., Vikharev A. A. // AIP Conf. Procs. 2017. V. 1812. Art. no. 080005. <https://doi.org/10.1063/1.4975891>
8. Kuzikov S. V., Bogdanov S. A., Gacheva E. I., et al. // Procs. 38th Int. Free-Electron Laser Conf. (FEL-2017), 20–25 August 2017, Santa Fe, USA. P. 436–438. <https://doi.org/10.18429/JACoW-FEL2017-WEP012>
9. Serafini L., Rosenzweig J. // Phys. Rev. E. 1997. V. 55, No. 6. P. 7565–7590. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.7565>
10. Mironov S. Y., Poteomkin A. K., Gacheva E. I., et al. // Laser Phys. Lett. 2016. V. 13, No. 5. Art. no. 055003. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/13/5/055003>

11. Миронов С. Ю., Андрианов А. В., Гачева Е. И. и др. // Успехи физ. наук. 2017. Т. 187, № 10. С. 1121–1133. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038143>
12. Kuzmin I., Mironov S., Gacheva E., et al. // Laser Phys. Lett. 2019. V. 16, No. 1. Art. no. 015001. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aaef95>
13. Alekshin Yu. I., Altshuller G. M., Pavlovsky O. N., et al. // Int. J. IR and MM Waves. 1990. V. 11, No. 8. P. 961–971. <https://doi.org/10.1007/BF01008638>
14. Krasil'nikov A. A., Kulikov Yu. Yu., Ryskin V. G., et al. // Instrum. Exp. Tech. 2011. V. 54, No. 1. P. 118–123. <https://doi.org/10.1134/S0020441211010167>
15. Makarov D. S., Tretyakov M. Yu., Shkaev A. P., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105, No. 6. Art. no. 063502. <https://doi.org/10.1063/1.4891503>
16. Doose J., Guarnieri A., Neustock W., et al. // Z. Naturforsch. 1989. V. 44, No. 6. P. 538–550. <https://doi.org/10.1515/zna-1989-0609>
17. Optical engineering of diamond / ed by R. P. Mildren, J. Rabeau. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 520 p.
18. Феоктистов Н. А., Грудинкин С. А., Рыбин М. В. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 7. С. 64–71.
19. Пат. 2658580 РФ, МПК H01J 40/06 (2006.01), H01J 1/34 (2006.01). Алмазный фотокатод: № 2017124575 : заявл. 10.07.2017 : опубл. 21.06.2018 / Вихарев А. Л., Иванов О. А., Кузиков С. В. 17 с.
20. Quintero K. J. P., Antipov S., Sumant A. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105, No. 12. Art. no. 123103. <https://doi.org/10.1063/1.4896418>
21. Williams O. A. // Diamond & Related Materials. 2011. V. 20, No. 5–6. P. 621–640. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.02.015>

Поступила в редакцию 28 июня 2020 г.; принята в печать 30 июля 2020 г.

## DEVELOPMENT OF PHOTOINJECTOR ACCELERATOR COMPLEX AT THE INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES: RESEARCH STATUS AND PROSPECTS

*A. A. Vikharev, A. L. Vikharev, E. I. Gacheva, O. A. Ivanov, S. V. Kuzikov, D. S. Makarov,  
M. A. Mart'yanov, S. Yu. Mironov, N. Yu. Peskov, A. K. Potemkin, M. Yu. Tret'yakov, and A. P. Shkaev*

This work is devoted to the studies performed at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences and aimed at the development of the accelerator photoinjector complex, which ensures formation of electron bunches with charges up to 100 pC for the particle energies 3–5 MeV. The key elements of the complex are described, namely, the accelerating resonator powered by the klystron with an operation frequency of 2.45 GHz and a power of 5 MW, a photocathode based on diamond films, a high-power ultraviolet laser, and a system for synchronization of laser pulses with the phase of the accelerating microwave field. The design parameters of the components of the complex are presented, and the state of research related to its realization is discussed.