

**THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS
B.I. STEPANOV INSTITUTE OF PHYSICS**

**PROCEEDINGS OF THE XIII BELARUSIAN-SERBIAN SYMPOSIUM
"PHYSICS AND DIAGNOSTICS OF LABORATORY AND
ASTROPHYSICAL PLASMAS" (PDP-13)**

December 13–17, 2021, Minsk, Belarus

Edited by A.N. Chumakov, M.M. Kuraica and M.S. Usachonak

**MINSK
«Kovcheg»
2021**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И.СТЕПАНОВА**

**ТРУДЫ XIII БЕЛОРУССКО-СЕРБСКОГО СИМПОЗИУМА
"ФИЗИКА И ДИАГНОСТИКА ЛАБОРАТОРНОЙ И
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ" (ФДП-13)**

13–17 декабря 2021 г., Минск, Беларусь

Под редакцией А.Н. Чумакова, М.М. Кураицы и М.С. Усачёнка

**МИНСК
«Ковчег»
2021**

УДК 533.9 (043.2)

ББК 22.3

Т78

Под редакцией

А.Н. Чумакова, М.М. Кураицы и М.С. Усачёнка

**ТРУДЫ ХІІІ БЕЛОРУССКО-СЕРБСКОГО СИМПОЗИУМА
T78 "ФІЗИКА І ДІАГНОСТИКА ЛАБОРАТОРНОЙ І
АСТРОФІЗИЧЕСКОЇ ПЛАЗМЫ" (ФДП-13) : Минск, 13–17
декабря 2021г. / Под ред. А.Н. Чумакова, М.М. Кураицы и
М.С. Усачёнка. – Электрон. дан. – Минск : Ковчег, 2021. – 1 электрон.
опт. флеш-карта (USB) ; 54 мм. – Систем. требования : IBM-
совместимый PC ; 256 Мб RAM ; VGA ; Windows 2000 / xp / Vista ; USB
разъём ; мышь. – Загл. с экрана.**

ISBN 978-985-884-108-9.

Сборник трудов составлен по материалам докладов, представленных на XIII Белорусско-Сербском симпозиуме "Физика и диагностика лабораторной и астрофизической плазмы" (ФДП-13), 13–17 декабря 2021 года, г. Минск. Тематика включенных в сборник статей охватывает широкий круг вопросов, касающихся способов получения плазмы, методов ее диагностики и их применения для решения актуальных практических задач.

The Proceedings have been compiled from materials of reports presented at The XIII Belarusian-Serbian Symposium "Physics and Diagnostics of Laboratory and Astrophysical Plasmas" (PDP-13), December 13–17, 2021, Minsk. The scope of papers covers a wide range of topics concerning techniques of plasma generation, methods of plasma diagnostics, and their application in solving real-world challenges of the present day.

УДК 533.9 (043.2)

ББК 22.3

ISBN 978-985-884-108-9

© B.I. Stepanov Institute of Physics, The
National Academy of Sciences of Belarus, 2021
© Оформление. ООО «Ковчег», 2021

SYMPORIUM ORGANIZERS

The National Academy of Sciences of Belarus
State Committee on Science and Technology of Belarus
Ministry of Education of the Republic of Belarus
Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research
B.I. Stepanov Institute of Physics of NAS of Belarus
Institute of Heat and Mass Transfer of NAS of Belarus
Belarusian State University
A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physical Problems

The papers in these Proceedings are presented by the individual authors. The views expressed are their own and do not necessarily represent the views of the Publishers or Sponsors. Whilst every effort has been made to ensure the accuracy of the information contained in this book, the Publisher or Sponsors cannot be held liable for any errors or omissions however caused.

**PROCEEDINGS OF THE XIII BELARUSIAN-SERBIAN SYMPOSIUM
"PHYSICS AND DIAGNOSTICS OF LABORATORY AND
ASTROPHYSICAL PLASMAS" (PDP-13): December 13–17, 2021, Minsk,
Belarus / Edited by A.N. Chumakov, M.M. Kuraica, M.S. Usachonak**

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the copyright owner.

HONOUR COMMITTEE

Chairman: S.Ya. Kilin (Deputy Chairman of the Presidium of NAS of Belarus)

S.S. Scherbakov (Vice-Chairman of the State Committee on Science and Technology of Belarus)

M.V. Bogdanovich (Director of The B.I. Stepanov Institute of Physics of NAS of Belarus)

The Ambassador of Serbia in the Republic of Belarus

S.V. Gaponenko (Chairman of the Scientific Council of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research)

A.D. Korol (Rector of the Belarusian State University)

P.V. Kuchinsky (Director of the A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University)

O.G. Penyazkov (General Director of the A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus)

A.P. Voitovich, A.F. Chernyavskii, V.I. Arkhipenko, V.K. Goncharov,
M.S. Dimitrijević, J. Purić, N. Konjević

PROGRAMME SCIENTIFIC COMMITTEE

Co-Chairmen: A.N. Chumakov (Belarus)
M.M. Kuraica (Serbia)

Vice-Chairmen: L.V. Simonchik (Belarus)
B. Obradović (Serbia)

Scientific Secretary: M.S. Usachonak (Belarus)

V.M. Astashynski (Belarus), M.V. Belkov (Belarus), N. Cvetanović (Serbia), I.I. Filatova (Belarus), K.V. Kozadaev (Belarus), M. Kuzmanović (Serbia), I.S. Nikanchuk (Belarus), L. Popović (Serbia), M.V. Puzyrov (Belarus), J. Savović (Serbia), A.S. Smetannikov (Belarus), I.P. Smyaglikov (Belarus), N.V. Tarasenko (Belarus), M. Trtica (Serbia).

LOCAL COMMITTEE

Chairmen: L.V. Simonchik (Belarus)

Vice-Chairmen: M.V. Puzyrov (Belarus)

Secretary: V.A. Lyushkevich (Belarus)

N.A. Bosak, E.A. Ershov-Pavlov, S.V. Goncharik, A.V. Kazak, V.G. Kornev, A.A. Kirillov, V.V. Lychkovskiy, M.I. Nedelko, A.A. Nevar, N.N. Tarasenka, A.M. Vabishchevich.

CONTENTS

I.B. Krstić, B.M. Obradović and M.M. Kuraica SPECTROSCOPY OF A MICROSECOND PULSED GLOW DISCHARGE	1
М.В. Пузырев, В.К. Гончаров, В.Ю. Ступакевич, Н.И. Шульган РАВНОМЕРНОСТЬ ИОННОГО ПОТОКА В ЛАЗЕРНО- ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ НАНОПОКРЫТИЙ	5
В.М. Асташинский, В.А. Васецкий, В.М. Грищенко, О.Г. Пенязьков, П.П. Храмцов, М.Ю. Черник ФОРМИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВСТРЕЧНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ МПК	9
N. Cvetanović EXPERIMENTAL STUDY OF A COLD PLASMA JET WITH SUB-MICROSECOND RISE TIME	13
A.V. Kazak, A.A. Kirillov, L.V. Simonchik, M.M. Kuraica, B.M. Obradovich, G.B. Sretenovich UV AND IR ABSORPTION SPECTROSCOPY METHODS FOR DETERMINATION OF CONCENTRATIONS OF BACTERICIDE COMPONENTS OF AIR PLASMA JET	17
A.V. Kazak, L.V. Simonchik, Y.P. Takalchyk, A.O. Pischukhina, K.N. Zhogal INFLUENCE OF AIR PLASMA JET ON THE RATE OF HEALING OF CUT WOUNDS IN RATS	21

M. Kostić, A. Kramar, B.M. Obradovic, M. Kuraica

EFFECT OF AGING OF ATMOSPHERIC PRESSURE
PLASMA TREATED COTTON FIBERS ON THEIR
ANTIMICROBIAL ACTIVITY

25

G.B. Sretenović, P.S. Iskrenović, V.V. Kovačević,
B.M. Obradović, M.M. Kuraica

MEASUREMENT OF THE PLASMA ACTION
ON A JET FLOW

29

L.V. Simonchik

FORMATION OF THE DETECTED PROFILE OF He I
492.2 NM LINE DURING DIAGNOSTICS OF DISCHARGES
AT ATMOSPHERIC PRESSURE

33

N. Sakan, Z.J. Simić

THE INTRODUCTION OF MORE COMPLEX ATOMS IN A
CUT-OFF COULOMB MODEL POTENTIAL, THE Ar I
MODEL

38

A. Zanko, A. Aksiuchyts, D. Kotov, K. Logunov,
Y. Zaparozhchanka

DIAGNOSTICS OF THE COLD ATMOSPHERIC PLASMA
JET CHARACTERISTICS

42

Y. Zaparozhchanka, A. Aksiuchyts, D. Kotov, A. Osipov

COLD ATMOSPHERIC PLASMA IMPACT IN SURFACE
PROPERTIES OF TOOTH ENAMEL

47

А.В. Тетерев, Л.В. Рудак, Н.И. Мисюченко, И.М. Козлов,
Л.К. Станчиц, А.С. Сметанников

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ
ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ
ГИПЕРЗВУКОВОМ ДВИЖЕНИИ ТЕЛ В АТМОСФЕРЕ

51

M. Kuzmanović, A. Stancalie, D. Ranković, A. Staicu, J.
Savović

OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY STUDY OF
Nd:YAG LASER INDUCED PLASMA ON GLAZED
CERAMICS

55

А.Н. Чумаков, В.В. Лычковский, И.С. Никончук

АБЛЯЦИЯ И ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ КРЕМНИЯ В
ВОЗДУХЕ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА
ДЛИНАХ ВОЛН 355 И 532 НМ

59

V.V. Lychkouski, A.N. Chumakov

PLASMA FORMATION BY LASER IRRADIATION OF Si
IN AIR WITH WAVELENGTHS OF 355 AND 532 NM

63

N. Trklja Boca, I.B. Krstić, Ž.Z. Mišković, P.S. Iskrenović,
R.M. Mitrović, B.M. Obradović, M.M. Kuraica

INVESTIGATION OF HIGH THERMAL LOADS
PRODUCES BY INTERACTION OF ACCELERATED
PLASMA WITH MATERIALS

67

В.В. Углов, С.В. Злоцкий, И.С. Веремей, И.А. Иванов и др.
СОСТАВ И СТРУКТУРА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК
HK-ZrN/a-ZrCu, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

71

В.В. Углов, С.В. Злоцкий, Н.А. Степанюк, М.М. Белов, И.А.
Иванов др.

СОСТАВ И МИКРОСТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CoCrFeMnNi,
ОБЛУЧЕННОГО ИОНАМИ ГЕЛИЯ

75

С.В.Васильев, И.К.Губаревич, А.Ю.Иванов ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦЫ В ВОЗДУХЕ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ	79
A.Yu. Ivanov, A.L. Sitkevich, S.V. Vasil'et al. DROPLETS GENERATION DURING LASER-PLASMA TREATING OF METAL SAMPLES IN EXTERNAL ELECTRIC FIELD	83
.	
A.S. Nikolić PREPARATION METHOD AND STARCH-ENCAPSULATION INFLUENCE ON THE COBALT FERRITE MAGNETIC PROPERTIES	87
S. Anufrick, A. Volodenkov, K. Znosko XeCl MINI LASER	88
.	
K. Znosko, V.Tarkovsky PROPERTIES OF NANOSTRUCTURES OBTAINED IN THE PLASMA OF AN ELECTRIC EXPLOSION OF CONDUCTORS IN A LIQUID	92
.	
K. Znosko SUBMICROSECOND XeC1 GAS-DISCHARGE SOURCE OF ULTRAVIOLET RADIATION	96
.	
D. Ranković, J. Petrović, M. Kuzmanović, M. Trtica, J. Savović SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF COAL PLASMA EMISSION INDUCED IN AMBIENT AIR BY TEA CO ₂ LASER PULSES	100

V. Lyushkevich, I. Filatova, V. Parashchuk, S. Goncharik INTERACTION OF CATALYTIC POWDER MATERIALS AND PLANT SEEDS WITH DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA	104
E.C. Воропай, Д.С. Тарасов, К.Ф. Ермалицкая, М.П. Самцов, К.А. Шевченко, А.А. Кирсанов АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР С ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМОЙ И АХРОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ РЕГИСТРАЦИИ	108
N. Leonovich, D. Kotov HIGH DENSITY PLASMA SETUP FOR DLC THIN FILMS DEPOSITION	112
Anishchenko S.V., Baryshevsky V.G., Gurinovich ELECTROSTATIC CUMULATION OF HIGH-CURRENT ELECTRON BEAMS FOR HIGH ENERGY DENSITY PHYSICS	116
S. Anishchenko, P. Molchanov, D. Leonenko VISUALIZATION AND DIAGNOSTICS OF HIGH POWER MICROWAVE PULSES BY GAS-DISCHARGE LAMPS	120
I. Maroz, E. Gurnevich THE SPONTANEOUS RADIATION OF ELECTRON BUNCH MOVING BETWEEN TWO PLANAR PERIODIC WIRE STRUCTURES OBLIQUELY TO THE AXES OF WIRES	124

А.Г. Анисович, И.И. Филатова	
ИЗМЕНЕНИЕ ТЕКСТУРЫ МЕДИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ВОЗДУХА	128
А.Г. Анисович, И.П. Акула, В.И. Журавлева, М.И. Маркевич, Н.М. Чекан	
МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТКАНИ 07С11-КВ И ТКАНИ С Zr ПОКРЫТИЕМ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	132
I.B. Krstić, B.M. Obradović, M.M. Kuraica	
MULTIPLE SEGMENTED GRIMM DISCHARGE AS SOURCE OF ACTIVE MEDIA FOR POSSIBLE OPTICAL AMPLIFICATION OF COPPER ION 224.7NM LINE	136
A. Nevar, M. Nedelko, N. Tarasenko, O. Murmantsev, A. Veklich, V. Boretskij, V. Ninyovskij, K.G. Lopatko	
PREPARATION OF COLLOIDAL NANOPARTICLES VIA ELECTRICAL DISCHARGES IN SOLUTIONS FOR BIOTECHNOLOGY APPLICATIONS	140
Е.В. Белецкий, А.Г. Сироткин, А.О. Радомцев, Е.А. Шустова, Е.А. Невар, М.И. Неделько, Н.Н. Тарапенко, Н.В. Тарапенко	
ПОЛУЧЕНИЕ ОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ	145
Е.А. Невар, М.И. Неделько, Е. Савович, М. Кузманович, Д. Ранкович, Н.В. Тарапенко	
МЕТОД LIBS С АНАЛИЗОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭМИССИОННЫХ ПОЛОС	149

N.V. Tarasenka, V.G. Kornev, N.N. Tarasenko APPLICATION OF LASER ABLATION PLASMA IN SOLUTION FOR DOPING OF NANOPARTICLES	153
K.Yu. Catsalap, M.A. Khodasevich, M.V. Belkov, D. A. Borisevich MULTIVARIATE CALIBRATION FOR C, Mn, Si, Cr, Ni AND Cu IN LOW-ALLOY STEELS BY LOW RESOLUTION LIBS	157
B.M. Асташинский, Г.М. Дзагнидзе, А.И. Иванов, Е.А. Костюкевич, А.М. Кузьмицкий ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ КОМПРЕССИОННОГО ПОТОКА В ТОРЦЕВОМ ЭРОЗИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ	161
M. Doroshko, U. Hryshchanka, V. Leschevich, A. Makhnach, V. Vasetskiy IMPROVEMENT OF A DISCHARGE CHAMBER DESIGN OF THE HYBRID MACROPARTICLE LAUNCHER	165
B.C. Скавыш, Г.В. Долголенко, А.С. Оленович, В.В. Савчин ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ГЕНЕРАТОР ПАРОВОДЯНОЙ ПЛАЗМЫ	169
A.I. Леончик, В.В. Савчин, И.В. Хведчин, Г.В. Долголенко, А.С. Оленович, Н.М. Курбанов КОНВЕРСИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В СИНТЕЗ-ГАЗ В ПЛАЗМЕННОМ РЕАКТОРЕ	172

М.Н. Бояков, С.В. Бондаренко, Д.В. Жук, А.Н. Моисеенко,
И.Л. Поболь

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ
ИОННОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ
УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

176

Н.А. Босак, А.Н. Чумаков, Л.В. Баран, А.Г. Кароза,
В.В. Малютина-Бронская, А.А. Иванов, Д.Л. Гринь

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ И
ЭЛЕКТРО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК
СВИНЦА

180

Н.А. Босак, А.Н. Чумаков, Л.В. Баран, А.Г. Кароза,
В.В. Малютина-Бронская, Я.А. Камзельский

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ И
ЭЛЕКТРО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК
ВИСМУТА

184

Н.А. Босак, А.Н. Чумаков, Н.Н. Васильев, А.А. Иванов,
Я.А. Камзельский, Д.Л. Гринь

ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ
ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ВИСМУТА В ВОЗДУХЕ НА
ДВУХ ДЛИНАХ ВОЛН

188

Аркар Чжо, Ф.М. Трухачев, М.М. Васильев, О.Ф. Петров,
Е.А. Кононов

АКТИВНОЕ БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ
ПЫЛЕВЫХ ЯНУС-ЧАСТИЦ В ВЧ-РАЗРЯДЕ

192

Н.В. Тарасенко, А.В. Буцень

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ПЛАЗМА В
ЖИДКОСТИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СИНТЕЗА
НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ

196

A. Murmantsev, A. Veklich, V. Boretskij, V. Ninyovskij,
K. Lopatko, N. Tarasenko

EMISSION SPECTRA OF UNDERWATER DISCHARGE
BETWEEN COPPER OR ZINC GRANULES

200

A.V. Kazak., L.V. Simonchik, M.S. Usachonak, Yu.S. Akishev,
A.V. Petryakov, V.V. Shkurko

TEMPORAL BEHAVIOR OF ELECTRONS DENSITY IN
A PLASMA JET OF AN ARGON DIELECTRIC BARRIER
DISCHARGE

204

Н. Курило, В. Шкурко

СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ КАДРОВ В
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

208

РАВНОМЕРНОСТЬ ИОННОГО ПОТОКА В ЛАЗЕРНОПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ НАНОПОКРЫТИЙ

В.К.Гончаров¹, М.В. Пузырев¹, В.Ю.Ступакевич², Н.И. Шульган³

¹Институт прикладных физических проблем им.А.Н.Севченко БГУ, ул. Курчатова, 7,
220045, г. Минск, Беларусь, puzyrev@bsu.by

²Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023,
г. Гродно, Беларусь, tv_sad@grsu.by

³Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск,
Беларусь, nikita.shulgans@gmail.com

Лазерноплазменный метод нанесения наноплёнок заключается в том, что эрозионный лазерный факел истекает в полупространство и часть продуктов разрушения лазерной мишени попадает на поверхность подложки. С целью достижения плавной регулировки энергии наносимых частиц в /1/ предложено поместить между лазерной мишенью и подложкой сетку. При подаче на сетку отрицательного по отношению к мишени потенциала после сетки формируется поток заряженных частиц, состоящий преимущественно из ионов. Подавая на сетку положительный потенциал по отношению к подложке, можно плавно изменять кинетическую энергию ионов. Это позволяет изменять режим нанесения нанопокрытий.

Были проведены работы по изучению режимов нанесения нанопокрытий различных материалов лазерной мишени на поверхность подложек из различных материалов /2/.

Однако, эти эксперименты проводились с подложками небольших размеров ($\sim 10 \text{ см}^2$). На практике часто необходимо наносить нанопокрытия на достаточно большие поверхности. Для этого нужно найти режимы работы лазерно-плазменного источника, при которых можно наносить равномерные нанопокрытия на большие поверхности.

Настоящая работа посвящена исследованию пространственного распределения плотности ионного потока на подложку в форме круга площадью $\sim 200 \text{ см}^2$.

Общая схема эксперимента описана в /1/. Взаимное расположение мишени, сетки, подложки и лазерного луча значительно зависят от объёма и формы вакуумной камеры. В настоящих экспериментах расстояние мишеней – подложка составляло 12 см, а сетка располагалась посередине между ними, то есть на расстоянии 6 см от поверхности мишени.

Так как в нашем лазерноплазменном источнике эрозионный лазерный факел осесимметричен, то и ионный поток, сформированный после сетки и

движущийся в сторону подложки тоже осесимметричен. Поэтому для контроля пространственного распределения плотности ионного потока на подложку достаточно контролировать изменение плотности ионного тока вдоль радиуса подложки.

С этой целью перед подложкой были расположены два дополнительных зонда площадью $1 \times 0,5$ см каждый. Один из них неподвижен и располагался в центре подложки. Другой имел возможность передвижения вдоль радиуса подложки от центра к краю. Общая схема эксперимента представлена на рис. 1.

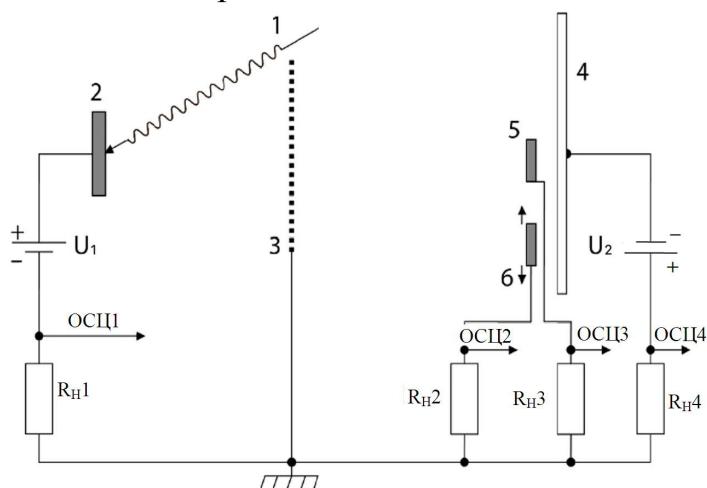


Рис. 1. Общая схема эксперимента. 1. – лазерное излучение, 2. – алюминиевая мишень, 3. – сетка, 4. – подложка, 5. – неподвижный зонд, 6. – подвижный зонд. ОСЦ1, ОСЦ2— сигналы, снимаемые на первый, ОСЦ3, ОСЦ4 на второй луч, U_1 и U_2 – независимые источники питания.

Так как мы использовали двухканальный осциллограф, то контроль электрических параметров элементов схемы (рис.1) производились последовательно по два параметра.

Так как в наших экспериментах использовался частотно-импульсный лазер с большим временем наработки, то уровень энергии в каждом импульсе может быть нестабильным. Для устранения влияния нестабильности лазера на результаты экспериментов проводились относительные измерения тока подвижного зонда I_2 к току неподвижного зонда I_1 . Измерения I_2/I_1 были проедены по отношению площадей и по отношению максимальных амплитуд тоже. Результаты оказались очень близки.

Эксперименты проводились с алюминиевой мишенью при плотности мощности в отдельном лазерном импульсе $\sim 3 \cdot 10^8$ Вт/см² при различных потенциалах электрического поля на подложке увеличенного размера.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

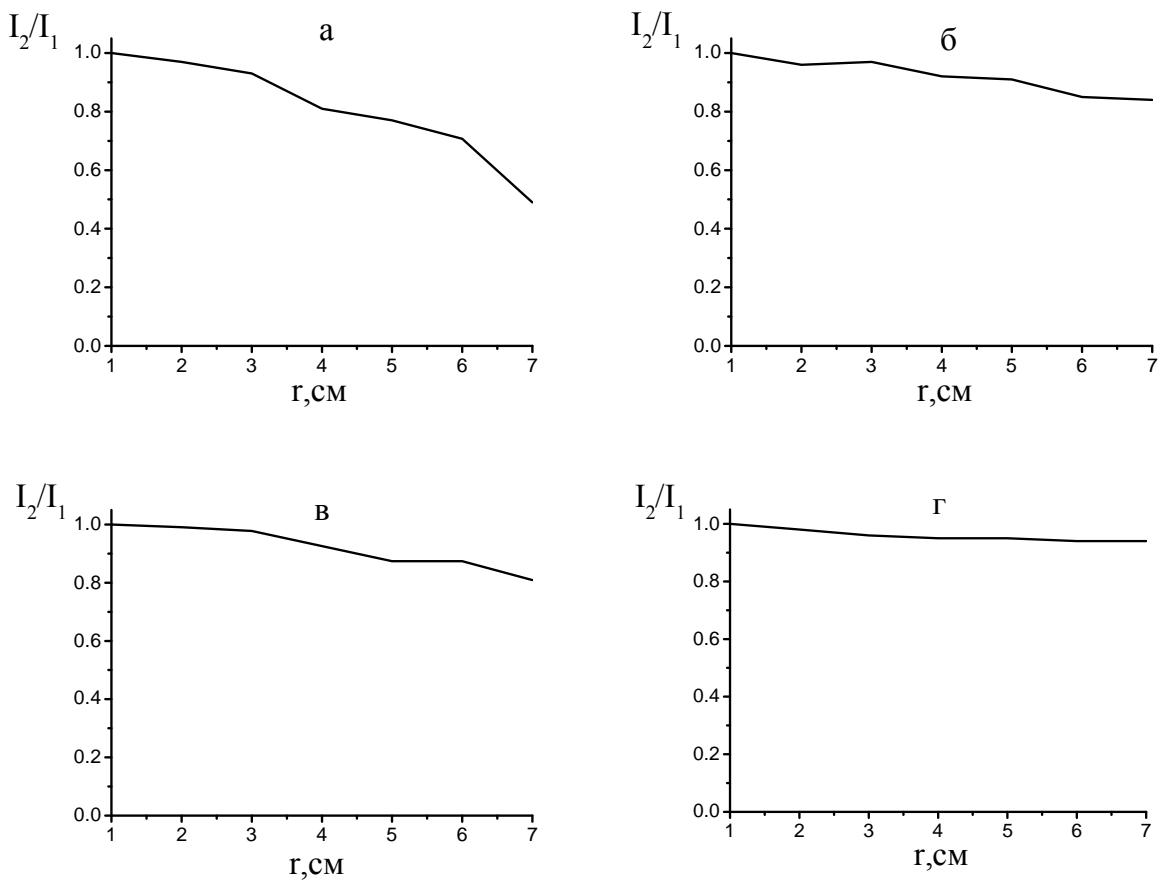


Рис. 2. Отношение тока подвижного зонда к неподвижному при воздействии лазерного излучения на алюминиевую мишень при плотности мощности $3 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$ при потенциале промежутка мишень – сетка 20В и при различных потенциалах в промежутке сетка – подложка: а - $U_2 = 0 \text{ В}$; б – $U_2 = 20 \text{ В}$; в – $U_2 = 50 \text{ В}$; г – $U_2 = 100 \text{ В}$.

На рис 2.а представлена кривая изменения вдоль радиуса подложки увеличенных размеров отношений токов подвижного и неподвижного зондов без подачи потенциала на промежуток сетка – подложка.

Из рисунка видно, что вдоль кривой наблюдается некоторая неравномерность. Она может определяться неравномерностью лазерного излучения по пятну излучения и неравномерностью формы эрозионного пятна в зоне лазерного излучения. Поэтому ионный поток после сетки в отсутствии электрического потенциала в промежутке сетка-подложка определяется только кинетической энергией ионов за счет плазмодинамического давления в эрозионном лазерном факеле в промежутке мишень – сетка. Однако такой режим в лазерноплазменном источнике нанесения нанопокрытий использовать нецелесообразно.

При подаче на сетку по отношению к подложке положительного потенциала 20 В (см. рис. 2б) неоднородности уменьшаются за счет дополнительного более равномерного увеличения кинетической энергии в

электрическом поле. Следует заметить, что в таких условиях обычно происходит напыление материала лазерной мишени на подложку /2/.

При увеличении потенциала в промежутке сетка – подложка до 50 В наблюдается некоторое увеличение неоднородности плотности ионного потока вдоль радиуса подложки увеличенных размеров (рис. 2.в). Это можно объяснить неоднородностью вторичной ионной эмиссии с поверхности подложки, связанной с неоднородностью параметров поверхности подложки увеличенных размеров

При появлении вторичной эмиссии регистрируется режим травления поверхности подложки /2/, что способствует увеличению адгезии. При дальнейшем увеличении кинетической энергии ионов за счет электрического поля в промежутке сетка – подложка (см. рис. 2г) энергия ионов возрастает так, что её хватает для имплантации ионов материала мишени в приповерхностную область подложки. При таких параметрах ионов потока сечение столкновения ионов потока с ионами подложки уменьшается. Как видно из рисунка при этом наблюдается минимальная неравномерность плотности ионного потока на подложку (~5%).

Такой режим соответствует созданию псевдодифузионного слоя на поверхности подложки материала лазерной мишени, что способствует увеличению адгезии.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что однородность плотности ионных потоков на подложку увеличенных размеров ($\sim 200 \text{ см}^2$) в лазерноплазменном источнике нанесения нанопокрытий можно повысить, подавая ускоряющий потенциал на подложку, по отношению к сетке. Разница между плотностью ионного потока в центре подложки и на расстоянии 7 см от нее составляет величину ~5%. В результате технологически можно производить очистку поверхности подложки ионами материала лазерной мишени (вторичная эмиссия), создавать псевдодифузионный слой материала мишени в приповерхностной области подложки, наносить на подложку материал лазерной мишени. При этом все эти операции можно делать последовательно не разгерметизируя вакуумную камеру.

Это позволит получить нанопокрытия с высокой адгезией и на подложках увеличенных размеров.

Библиографические ссылки

1. Гончаров В.К. Журнал Белорусского государственного университета. Физика, № 3. (2017) 79-87.
2. Goncharov V.K Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 91, No. 4 (2018) 1056-1062.

Научное издание

**ТРУДЫ ХІІІ БЕЛОРУССКО-СЕРБСКОГО СИМПОЗИУМА
"ФІЗИКА І ДІАГНОСТИКА ЛАБОРАТОРНОЙ І
АСТРОФІЗИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ" (ФДП-13)**

Мінск, 13–17 лістапада 2021 г.

Сборник научных статей

**Материалы опубликованы в виде,
представленном авторами - участниками Симпозиума**

Под редакцией
А.Н. Чумакова, М.М. Кураицы и М.С. Усачёнка

Институт физики НАН Беларуси
220072 г. Минск, пр. Независимости, 68.

Оформление. ООО «Ковчег» Свидетельство о ГРИИРПИ
№ 1/381 от 01.07.2014
Ул. Л. Беды, 11/1-205, 220040 г. Минск
Тел./факс: (017) 379 19 81. E-mail: kovcheg_info@tut.by
Instagram: kovcheg_info, Facebook: infoKOVCHEG

ISBN 978-985-884-108-9



9 789858 841089