

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

---

**V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ»  
ЛАПЛАЗ-2019**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

**Часть 2**

**Москва**

УДК

001.89:[621.373.826+533.9+539.2+621.384+530.1+006.92:531.761](06)

ББК 72г

М43

**V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019: Сборник научных трудов.** М.: НИЯУ МИФИ, 2019. – 388 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2019», которая пройдет с 12 февраля по 15 февраля 2019 года в НИЯУ МИФИ. 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

Статьи получены до 31 января 2019 года.

Материалы издаются в авторской редакции.

Ответственные редакторы

- Соловьев И.А.
- Степаненко А.А.

ISBN 978-5-7262-2545-6

©Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2019

Подписано в печать 11.02.2019. Формат 60×84 1/16

Печ. л. 24,25. Тираж 350 экз. Заказ № 9.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Типография НИЯУ МИФИ  
115409, Москва, Каширское ш., 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., и.о. директора Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ – зам. председателя Программного комитета
- Батани Дино Димитри – Университет Бордо, Франция
- Бармаков Юрий Николаевич – д.т.н., первый заместитель научного руководителя ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, и.о. директора Института физико-технических интеллектуальных систем НИЯУ МИФИ
- Ван Оост Гвидо – Университет Гента, Бельгия
- 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 «Химическая физика» НИЯУ МИФИ
- Евтихий Николай Николаевич – заместитель генерального директора ООО «НТО «ИРЭ-ПОЛЮС», заведующий кафедрой «Лазерная физика» НИЯУ МИФИ
- Илькаев Радий Иванович – почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ
- Колачевский Николай Николаевич – член-корр. РАН, директор Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
- Курнаев Валерий Александрович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика плазмы» НИЯУ МИФИ
- Менушенков Алексей Павлович – д.ф.-м.н., профессор, и .о. заведующего кафедрой «Физика твердого тела и наносистем» НИЯУ МИФИ
- Попруженко Сергей Васильевич – д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ
- Пуранс Юрис – д.ф.-м.н., профессор, член Латвийской Академии Наук, Университет Латвии
- Смирнов Валентин Пантелеймонович – академик РАН, АО «Наука и инновации» ГК Росатом
- Собенин Николай Павлович – профессор, д.т.н., НИЯУ МИФИ
- Сон Эдуард Евгеньевич – академик РАН, руководитель НИЦ-4 Объединенного института высоких температур РАН
- Фертман Александр Давидович – к.ф.-м.н, директор по науке Кластера ядерных технологий Фонда «Сколково»

- Черковец Владимир Евгеньевич – д.ф-м.н., профессор, научный руководитель АО ГНЦ «ТРИНИТИ»

#### **Организационный комитет конференции**

- Кузнецов А.П. – НИЯУ МИФИ — председатель Организационного комитета
- Генисаретская С.В. – НИЯУ МИФИ — заместитель председателя Организационного комитета
- Кузнецов А.В. – НИЯУ МИФИ
- Борисюк П.В. – НИЯУ МИФИ
- Гусарова М.А. – НИЯУ МИФИ
- Гаспарян Ю.М. – НИЯУ МИФИ
- Городничев Е.Е. – НИЯУ МИФИ
- Соловьев И.А. – НИЯУ МИФИ
- Степаненко А.А. – НИЯУ МИФИ

**Адрес в Интернет:** <http://conf.laplas.mephi.ru/>

**Секция**  
**УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ**

О.С. БЕЛОЗЕРОВ, Ю.Л. БАКШАЕВ, С.А. ДАНЬКО Диагностические методики и эксперимент по ускорению ионов в генераторе РЭП «Кальмар».....	23
К.В. БРУШЛИНСКИЙ Математические модели и расчеты в плазодинамических и плазмостатических научно-технических задачах .....	25
Г.В. ДОЛГОЛЕВА Сжатие и горение мишеней при учете переноса быстрых заряженных частиц .....	27
А.Б. КУКУШКИН, М.Г. ЛЕВАШОВА Вклад эффекта Холла в радиальное электрическое поле и спонтанное вращение в центральной плазме токамака .....	29
В.А. ЛЫКОВ, Е.С. БАКУРКИНА, Н.Г. КАРЛЫХАНОВ Г.Н. РЫКОВАНОВ, И.А. ХИМИЧ и В.Е. ЧЕРНЯКОВ Расчеты мишеней прямого облучения для мегаджоульных установок с излучением во 2 <sup>ой</sup> и 3 <sup>ей</sup> гармониках ND-лазера.....	31
В.В. КУЗЕНОВ, С.В. РЫЖКОВ Моделирование основных плазодинамических характеристик лазерного факела вблизи конденсированной преграды .....	33
И.А. ХИМИЧ, Н.Г. КАРЛЫХАНОВ, В.А. ЛЫКОВ и Г.Н. РЫКОВАНОВ Уменьшение перекачки энергии в пересекающихся лазерных пучках при многочастотном облучении мишеней прямого воздействия.....	35
А.А. СТЕПАНЕНКО Влияние частичной вмороженности магнитного поля на динамику бловов в пристеночной области токамаков .....	37
А.Б. ЛЯШЕНКО, А.А. ПШЕНОВ, А.А. СТЕПАНЕНКО Подготовка профилей параметров плазмы и расчетных сеток для моделирования динамики бловов на периферии токамака Т-15 .....	39
В.Е. НИКОЛАЕВА, Г.М. ВОРОБЬЕВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Д.П. ИВАНОВ, С.А. КРАТ, В.А. КУРНАЕВ, А.В. МЕЛЬНИКОВ Статус разработки токамака МИФИСТ .....	41

**Секция**  
**ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В.В. АНДРЕЕВ, Г.А. КРАВЧЕНКО, Ю.П. ПИЧУГИН Исследование короностойких покрытий в плазмохимических генераторах озона .....	45
В.В. АНДРЕЕВ Особенности осуществления барьерного электрического разряда в ячейках с вращающимся диэлектриком .....	47
О.А. БАШУТИН, П.П. СИДОРОВ Реализация плазменного фокуса с преионизацией .....	49
О.А. БАШУТИН, Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ Исследование плазмы вакуумной искры вблизи поверхности электродов .....	51
Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, Н.В. ВОЛКОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ Образование плазмы сверхвысокой плотности в основании пинчевых разрядов и послеразрядная эмиссия электронов .....	53
А.М. БОРИСОВ, Б.Л. КРИТ, В.Б. ЛЮДИН, И.В. СУМИНОВ, А.В. ЭПЕЛЬФЕЛЬД, К.А. АНИКИН, И.О. КОНДРАЦКИЙ Влияние состава электролита на формирование и свойства оксидных плазменно-электролитических покрытий на алюминиевом сплаве .....	55
Ю.В. БОРИСЮК, Н.М. МИХАЙЛИЦЫНА, В.Е. ДРОБИНИН, М.М. БЕРДНИКОВА, А.А. ПИСАРЕВ Азотирование сталей 30ХГСА, 30ХН2МФА и 03Х11Н10М2Т-ВД .....	57
В.В. БОРОГ, Н.В. ОСЕТРОВА Мониторинг быстрого солнечного ветра по вариациям космических лучей .....	59
К.Ю. ВАГИН, Т.В. МАМОНТОВА, С.А. УРЮПИН Волны в плазме с несколькими пиками в распределении фотоэлектронов .....	61
А.А. ГАРМАТИНА, А.А. АНДРЕЕВ, А.А. КОНОВКО, Ф.В. ПОТЕМКИН и В.М. ГОРДИЕНКО Генерация импульсно-периодического рентгеновского излучения из фемтосекундной лазерной плазмы зажигаемой на поверхности наноструктурированной магнитной ленты .....	63
А.Е. ЕВСИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.В. ГРУНИН, А.С. ДРОЗД, В.А. КУРНАЕВ, Я.А. САДОВСКИЙ, И.А. СОРОКИН,	

Н.А. ВОРОНА, А.В. ГАВРИКОВ, А.О. СЕРОВ, В.П. СМИРНОВ Закономерности термического и плазменного восстановления порошка оксида церия .....	65
А.Е. ЕВСИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, И.С. КУДАШЕВ Оксидирование циркония в кислородосодержащей гелиевой плазме.....	67
И.Ю. КАЛАШНИКОВ, П.Д. ШАРДОННЕ, В.М. ЧЕЧЕТКИН, А.В. ДОДИН, В.И. КРАЗ Динамика распространения последовательных выбросов в лабораторных и астрофизических джетах и проблема их коллимации.....	69
А.Р. КАРИМОВ, С.А. ТЕРЕХОВ, А.Е. ШИКАНОВ, П.А. МУРАД, К.И. КОЗЛОВСКИЙ Ускорение многокомпонентной плазмы.....	71
С.А. КАРПОВ, И.Ф. ПОТАПЕНКО, В.Ю. БЫЧЕНКОВ Электронная функция распределения при наличии резкого градиента температуры в лазерной плазме.....	73
Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ Изучение влияния плазмы на поверхность электродов при разряде в электролите.....	75
К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.Е. ШИКАНОВ, А.Р. КАРИМОВ, А.А. ИСАЕВ, А.А. ПЛЕТНЕВ, О.В. ДЕРЯБОЧКИН Коллективное ускорение ионов в импульсном магнитном поле конической спирали.....	77
Д.В. КОЛОДКО, И.А. СОРОКИН, Е.Г. ШУСТИН Модель слоя плазмы, формируемого электронным пучком .....	79
А.А. КОТКОВ, Д.В. СИНИЦЫН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ, Д.В. МОКРОУСОВА, А.К. КУРНОСОВ Криогенный озонатор.....	81
Е.Д. МАРЕНКОВ, К.М. ГУТОРОВ, И.А. СОРОКИН Особенности временной зависимости излучения атомов тяжелой примеси в плазме .....	83
И.И. МЕТЕЛЬСКИЙ, В.Ф. КОВАЛЕВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ Релятивистский плазменный резонанс и генерация гармоник в неоднородной лазерной плазме .....	85
А.В. МИШИН, А.А. НЕЧАЕВ, М.А. ГАРАСЁВ, А.Н. СТЕПАНОВ, Вл.В. КОЧАРОВСКИЙ Формирование горба плотности на фронте бесстолкновительной ударной волны при разлете горячей плотной плазмы в разреженную .....	87
А.А. НЕЧАЕВ, М.А. ГАРАСЁВ, А.Н. СТЕПАНОВ,	

А.В. МИШИН, Вл.В. КОЧАРОВСКИЙ Генерация магнитного поля за фронтом бесстолкновительной ударной волны при разлете горячей плотной плазмы .....	89
А.Т. СААКЯН, А.А. КОЛОГРИВОВ, Т.Т. КОНДРАТЕНКО, В.Н. ПУЗЫРЁВ, А.Н. СТАРОДУБ, А.А. ФРОНЯ, О.Ф. ЯКУШЕВ Исследования гидродинамической эффективности лазерно-плазменного взаимодействия и пространственного рассеяния излучения плазмой на установке «Канал-2» .....	91
В.П. САВИНОВ, М.С. КРУГЛОВ, В.А. РЯБЫЙ, А.В. ЧЕРВЯКОВ, В.Г. ЯКУНИН Взаимодействие плазмы с граничными поверхностями в ВЧ емкостном разряде низкого давления .....	93
С.В. САВУШКИНА, Г.В. ПАНАСОВА, Е.А. ВЫСОТИНА Исследование теплопроводности и критической нагрузки разрушения плазменных градиентных покрытий с верхним слоем оксида гафния .....	95
А.В. АГАФОНОВ, Д.С. СТЕПАНОВ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ Влияние конфигурации анода на динамику плазменных потоков в источнике Пеннинга .....	97
Е.В. СТЕПИН Численные исследования МГД-течений в каналах плазменных ускорителей с продольным магнитным полем .....	99
А.А. ФРОНЯ, Н.Г. БОРИСЕНКО, В.Н. ПУЗЫРЕВ, А.Т. СААКЯН, А.Н. СТАРОДУБ, О.Ф. ЯКУШЕВ Особенности генерации второй гармоники в плазме ТАЦ мишеней .....	101
А.В. КАЗИЕВ, А.В. ТУМАРКИН, Д.В. КОЛОДКО, М.М. ХАРЬКОВ, К.А. ЛЕОНОВА, Д.Г. АГЕЙЧЕНКОВ Вольт-амперные характеристики импульсного магнетронного разряда с горячим катодом .....	103
А.В. КАЗИЕВ, М.А. КОНДРАТЬЕВ, А.В. ТУМАРКИН, К.А. ЛЕОНОВА, М.М. ХАРЬКОВ, Т.В. СТЕПАНОВА Характеристики сильноточного импульсного магнетронного разряда при реактивном распылении алюминия .....	104
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.Н. ВОЙТЮК, С.С. ДОВГАНЮК, А.С. КАПЛЕСКИЙ, Н.Н. КАСИМОВА, Г.П. ТИМКОВСКИЙ Вольфрам-алюминиевые слои. Захват водорода, модификация и обезгаживание при нагреве .....	105
В.П. ТАРАКАНОВ, Е.Г. ШУСТИН	

**Секция**  
**УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**  
**И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

- И.А. АШАНИН, С.В. БАРАБИН, А.Е. БЛАГОВ, Ю.А. БАШМАКОВ,  
А.Е. БОЛЬШАКОВ, А.А. ГОГИН, М.А. ГУСАРОВА, Д.К. ДАНИЛОВА,  
В.В. ДМИТРИЕВА, В.С. ДЮБКОВ, А.В. ЗИЯТДИНОВА,  
Ю.Д. КЛЮЧЕВСКАЯ, В.Н. КОРЧУГАНОВ, Р.П. КУЙБИДА,  
Т.В. КУЛЕВОЙ, М.В. ЛАЛАЯН, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, Т.А. ЛОЗЕЕВА,  
Д.А. ЛЯКИН, А.А. МАХОРО, С.В. МАЦИЕВСКИЙ,  
В.Ю. МЕХАНИКОВА, О.А. МОСОЛОВА, А.Ю. ОРЛОВ,  
А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, А.А. ПОНОМАРЕНКО,  
О.В. ПОРВАТКИНА, А.И. ПРОНИКОВ, В.И. РАЩИКОВ,  
А.А. САВЧЕНКО, М.С. САРАТОВСКИХ, Р.А. СЕНИН,  
А.Л. СИТНИКОВ, А.С. СМЫГАЧЕВА, А.А. ТИЩЕНКО,  
А.М. ФЕЩЕНКО, Е.А. ФОМИН, Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА, В.Л. ШАТОХИН,  
J.-C. BIASCI, J. JACOB, S. LIUZZO, P. RAIMONDI, J.-L. REVOL,  
S. WHITE, J. CHAVANNE, C. MACCARRONE, G. LE VEC,  
K.-V. SCHEIDT, J.M. CHAIZE, H. PEDROSO-MARQUES
- Текущие результаты работ по разработке ускорительного комплекса  
российского специализированного источника синхротронного  
излучения 4го поколения ИССИ-4 ..... 110
- В.С. ДЮБКОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, Т.А. ЛОЗЕЕВА,  
В.Ю. МЕХАНИКОВА, С.М. ЛИУЦО
- Предварительные результаты расчета магнитной структуры и динамики  
электронов в основном накопительном синхротроне на энергию 6 ГэВ  
проекта ИССИ-4 ..... 112
- С.В. БАРАБИН, Д.А. ЛЯКИН, Т.В. КУЛЕВОЙ, А.Ю. ОРЛОВ,  
М.С. САРАТОВСКИХ
- Система управления и диагностики специализированного источника  
синхротронного излучения 4-го поколения – ИССИ-4 ..... 114
- Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ
- Численное моделирование динамики пучка для начальных секций с  
ПОКФ ускорителей LINAC-100 и LINAC-30 для MEGA-SCIENCE  
проекта DERICA ..... 116
- Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ, А.В. САМОШИН, Л.В. ГРИГОРЕНКО,  
А.С. ФОМИЧЕВ, В. БАРТ, С. Г. ЯРАМЫШЕВ

Моделирование динамики пучка в сверхпроводящем ускорителе-драйвере LINAC-00 для проекта DERICA .....	118
<b>Н. В. АВРЕЛИН</b>	
Защита и контроль состояния ВЧ-системы для циклотрона 520 МэВ .....	120
<b>В.В.ПАРАМОНОВ, А.П. ДУРКИН</b>	
Сравнение характеристик ускоряющих структур на высокой рабочей частоте для ускорения протонов низкой энергии .....	122
<b>М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН, С.В. МАЦИЕВСКИЙ, Р.Е. НЕМЧЕНКО</b>	
Разработка устройства ввода мощности для проведения тестов полуволновых сверхпроводящих резонаторов .....	124
<b>О.И. ДРИВОТИН, Д.А.СТАРИКОВ</b>	
Математическая модель оптимизации ускорительной структуры с ПОКФ на основе метода второго порядка .....	126
<b>С.Н.АНДРИАНОВ, Н.С. ЕДАМЕНКО</b>	
Компьютерная параметрическая идентификация систем управления пучками частиц .....	128
<b>А.Р. КАРИМОВ, А.М. БУЛЫГИН</b>	
Охлаждение ионных пучков в скрещенных магнитных полях .....	130
<b>А.Е. АКСЕНТЬЕВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ</b>	
Декогеренция спина в структуре с замороженным спином, её подавление и эффект на ЭДМ статистику в методе frequency domain .....	132
<b>П.А. БЫСТРОВ, Ю.С. ПАВЛОВ</b>	
Коррекция влияния гистерезиса в стальном ярме магнита системы развертки на эффективность ускорителя УЭЛВ-10-10-С-70 .....	134
<b>П.А. БЫСТРОВ, П.Н. ГУЛЯЕВ, А.В. ПРОКОПЕНКО</b>	
Моделирование экспериментов с электронным пучком при помощи компьютерных программ "BEAM SCANNING" и "GEANT4" .....	136
<b>Г.П. АВЕРЬЯНОВ, В.А. БУДКИН, В.В. ДМИТРИЕВА</b>	
Предпроектное моделирование подсистем ускорителей заряженных частиц в виртуальных лабораториях электрофизики .....	138
<b>В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ</b>	
Расчетное моделирование рабочих режимов системы питания гибридной ускоряющей структуры .....	140
<b>А. А. МАХОРО, В. Ю. МЕХАНИКОВА, О. А. МОСОЛОВА, С. М. ПОЛОЗОВ</b>	
Моделирование распределения полей в прототипах магнитов основного накопителя ИССИ-4 .....	142

А.А. МАХОРО	
Излучение поворотных магнитов и вставных устройств основного накопителя ИССИ-4 .....	144
В. С. ДЮБКОВ, Ю. Ю. ЛОЗЕЕВ, Т. А. ЛОЗЕЕВА, В. Ю. МЕХАНИКОВА	
Оптимизация магнитной структуры основного накопителя источника синхротронного излучения ИССИ-4 для увеличения апертуры вакуумной камеры .....	146
О.А. МОСОЛОВА, В.С. ДЮБКОВ, С.М. ПОЛОЗОВ	
Структура компактного бустерного синхротрона ИССИ-4 .....	148
В.В. КОНДРАТЕНКО, Н.С. ШИШКИНА, О.В. КАРАСТОЯНОВА, Н.И. ШАТАЛОВА, Н.В. КОРОВКИНА, Н.М. СТЕПАНИЩЕВА, В.Т. ТАРАСЮК, Н.И. ФЕДЯНИНА, М.Т. ЛЕВШЕНКО, А.В. ПРОКОПЕНКО	
Исследование эффективности обработки листовых овощей ускоренными электронами .....	150
В.Т. ТАРАСЮК, А.В. ПРОКОПЕНКО, С.Ю. КУПРЕЕНКО, Н.Е. СТРОКОВА	
Изучение структуры пленочного полимерного материала полиамид/полиэтилен при облучении на ускорителях электронов .....	152
М.А. ГУЗОВ, А.В. ИЛЬИНСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ, В.Г. ЦЕЙТЛИН, А.Е. ШИКАНОВ	
Компьютерное моделирование сигналов импульсного нейтронного каротажа .....	154
Н.Е. РОЗАНОВ	
Динамика электронного пучка в сильноточной лампе бегущей волны .....	156
В.С. ДЮБКОВ, А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН	
Проектирование вакуумной системы ИССИ-4 .....	158
А.Ю. ЖДАНОВА, И.Д. РУБЦОВА	
Моделирование и оптимизация динамики интенсивного пучка в поле бегущей волны .....	160
С.Н. АНДРИАНОВ, АЛЬЗАЯДИ ЛАИС Х МАЛЕК	
Математическое моделирование сложно составных систем управления пучками частиц .....	162
И.Д. РУБЦОВА, Л.В. ВЛАДИМИРОВА, Н.С. ЕДАМЕНКО, А.Б. ГОНЧАРОВА	
Исследование динамики интенсивного пучка в ускорителе Альвареца .....	164
Г.О. БУЯНОВ	
Динамика микротел в радиационных поясах земли .....	166

Г.О. БУЯНОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ, В.А. СЕНИУКОВ Ускорение сферических объектов лазерным пучком трубчатой конфигурации за счет испарения поверхности .....	168
А.В. ЗИЯТДИНОВА, П.А. ФЕДИН, А.А. НИКИТИН, С.В. РОГОЖКИН, Т.В. КУЛЕВОЙ Моделирование пробегов ионов в материале мишени для инжекционного комплекса установки BELA .....	170
А.А. САВЧЕНКО, В. ВАГНЕР Недипольность излучения при осевом каналировании электронных пучков с ГэВными энергиями .....	172
И. АДАМ, А.А. БАЛДИН, А.И. БЕРЛЕВ, Н.И. ЗАМЯТИН, И.И. МАРЬИН, М. ПАРАЙПАН, А.А. СОЛНЫШКИН, В.И. СТЕГАЙЛОВ, С.И. ТЮТЮННИКОВ, И.П.ЮДИН Облучение урановой мишени «КВИНТА» на выведенных пучках ускорителя ОИЯИ .....	174
П.А. БЫСТРОВ, Ю.С. ПАВЛОВ Теоретические основы построения алгоритма расчета доз методом сеток для облучаемых объектов на электронных ускорителях .....	176
Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА, Р.О. ГАВРИЛИН, П.А. ФЕДИН, А.О. ХУРЧИЕВ, Р.П. КУЙБИДА, А.В. КАНЦЫРЕВ, С.А. ВЫСОЦКИЙ, Т.В. КУЛЕВОЙ Расчёт динамики пучка в экспериментальной установке для плазменных исследований на ускорителе ТИПР-1 .....	178
М.М.КАЦ Сравнение оборудования для лучевой терапии рака .....	180
П.А.ФЕДИН, К.Е.ПРЯНИШНИКОВ, Р.П.КУЙБИДА А.А.НИКИТИН, Н.П. БОБЫРЬ, С.В.РОГОЖКИН, Т.В.КУЛЕВОЙ Первые результаты изучения радиационной стойкости сплава W-5Re после облучение на тяжело-ионном ускорителе ТИПр .....	181
К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.Д. ВОВЧЕНКО, М.И. ЛИСОВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ, А.Е. ШИКАНОВ, Е.А. ШИКАНОВ Высоковольтный генератор для получения коротких импульсных электронных потоков .....	183
Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, М.С. ДМИТРИЕВ, Ю.Ф. ЖУЙКОВ, А.П. КЛАЧКОВ, А.Д. КОЛЯСКИН, А.В. НЕСТЕРОВИЧ, А.Г. ПОНОМАРЕНКО, А.Е. ШИКАНОВ, Электрофизическая технология повышения дебита скважины с высоковязкой нефтью .....	185
А.Н. ПЕТРОВ, Н.С. ШИШКИНА, О.В. КАРАСТОЯНОВА, Н.И. ФЕДЯНИНА, М.Т. ЛЕВШЕНКО, А.В. ПРОКОПЕНКО Радиационная обработка ускоренными электронами для оптимизации технологии холодильного хранения плодовоовощной продукции ...	187

Ж.А. СЕМЕНОВА, А.Ю. КОЛОКОЛОВА, Н.В. ИЛЮХИНА,  
М.Т. ЛЕВШЕНКО, М.Н. КУРБАНОВА, А.В. ПРОКОПЕНКО,  
О.А. ШИЛОВ

Влияние обработки поверхности свежих грибов шампиньонов  
релятивистскими электронами ..... 189

### Секция

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

А.Н. АБЛЕЕВ, Е.М. КУДРЯВЦЕВ, А.И. МАКСИМКИН, А.А. МОШЕВ,  
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, И.И. РОДЬКО, К.Л. СЕРГЕЕВ

Изготовление тестового образца для метрологического обеспечения  
вихретоковой установки контроля дефектности оболочек отработанных  
ТВЭЛов ..... 192

А.В. АРХИПОВ, Е. П. ГЛОТОВ, А.Н. ДАРМАЕВ, Д.А. КОМАРОВ, С.П.  
МОРЕВ, Ю.А. МИРОШНИКОВ

Применение негармонического распределения магнитного  
фокусирующего поля для транспортировки интенсивных электронных  
потоков в магнитных периодических фокусирующих системах ..... 194

Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, М.С. ДМИТРИЕВ, А.П. КЛАЧКОВ,  
А.В. НЕСТЕРОВИЧ, А.Г. ПОНОМАРЕНКО, А.Е. ШИКАНОВ

Электрофизическая аппаратура для добычи высоковязкой  
нефти ..... 196

А.В. БОЙКО, В.П. КИРЕЕВ, В.Г. КОВАЛЕНКО,  
С.А. КОРНИЕВСКИЙ

Модернизация устройства обмера термомлюминесцентных дозиметров  
..... 198

П.Г. ВАСИЛЬЕВА, Н.Г. ИГНАТЬЕВ, И.Е. ОРЛОВ

Исследование влияния сегментированности сцинтиллятора большого  
объема на время светосбора при использовании спектросмещающих  
WLS-световодов ..... 200

А.М. ВОЛКОВА, П.И. КОНОВАЛОВ, А.С. ШЛЫГИН, А.Ю. СОКОЛОВ,  
И.Г. ПРЯНИШНИКОВ, А.В. РЫЖКОВ

Метод измерения спектрального отношения сигнал-шум для планарных  
электронно-оптических преобразователей ..... 202

С.В. ГАВРИШ, В.В. ЛОГИНОВ, С.В. ПУЧНИНА

Технология получения спаев сапфира с металлами в изделиях  
плазменной и квантовой электроники ..... 204

М.Е. ДВОРНИЧЕНКО, В.Г. КАМЕНЕВ, В.Н. ТУРКИН,  
Д.Э. ЭРГАШЕВ

Покадровая регистрация на цифровой фотохронограф лазерно-оптических сигналов в быстропротекающих процессах .....	206
М.Е. ДВОРНИЧЕНКО, В.Г. КАМЕНЕВ	
Многоканальная регистрация и восстановление цифровых голограмм микроскопических объектов .....	208
М.С. ДМИТРИЕВ, А.Д. КОЛЯСКИН, В.Л. ШАТОХИН, Р.А. КРАСНОКУТСКИЙ	
Обезвоживание солевых плавов радиоактивных отходов аэс с применением индукционного нагрева и вакуумной откачки рабочей камеры .....	210
М.С. ДМИТРИЕВ, А.П. КЛАЧКОВ, А.Г. ПОНОМАРЕНКО	
Теплофизические основы аппаратуры для локального индукционного нагрева в технологии нефтедобычи .....	212
Ш.М. ИСМАИЛОВ, В.Г. КАМЕНЕВ	
Регистрация когерентного обратного рассеяния на цифровой фотохронограф с зеркальной развёрткой .....	214
В.Г. КАМЕНЕВ	
Повышение эффективности лазерно-оптических методов регистрации дисперсной фазы в быстропротекающих процессах .....	216
В.Г. КАМЕНЕВ, Н.А. КАМЕНЕВА	
Моделирование в среде ZEMAX и экспериментальная обработка телецентрической системы для регистрации цифровых голограмм .....	218
И.А. КАНЬШИН	
Метод измерения эмиттанса пучка заряженных частиц в нейтронных трубках .....	220
М.А. КАРПОВ	
Электрооптические затворы с контрастом 1:1000 и субмикросекундным временем переключения .....	222
М.А. КАРПОВ, Н.А. КЛЕОПОВА, С.А. ЗАТОЛОКИН	
Регистратор кадровых рентгенографических изображений прямого преобразования с экспозицией от 5 нс для диапазона от 0,01 до 300 кэВ .....	224
М.А. КАРПОВ, Н.В. ЧЕРНЕГА	
О возможности создания переносной системы рентгеновской голографии и микротомографии .....	227
Я.А. КОКОРЕВ, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА	
Спектральные характеристики потока нейтронов импульсного генератора, восстановленные с помощью активационных детекторов .....	229
П.И. КОНОВАЛОВ, А.Ю. СОКОЛОВ, А.В. СПАХОВ, И.Г. ПРЯНИШНИКОВ	

Исследование возможности формирования плоского ленточного пучка в катодной камере хронографического электронно-оптического преобразователя .....	231
А.И. МАКСИМКИН, Е.Г. БЕЛЕНДРЯСОВА, Е.М. КУДРЯВЦЕВ, А.Н. АБЛЕЕВ	
Особенности применения вихретокового метода для локального обнаружения дефектов в ТВЭЛах .....	233
С.П. МАСЛЕННИКОВ, А.С. СЕРЕБРЯКОВА	
Составные полупроводниковые коммутаторы для генераторов высоковольтных импульсов микросекундной длительности .....	235
И.С. МАСЛЕННИКОВА, В.В. ЛЫКОВ, С.В. КОЛПАЧКОВ	
Испытания на стойкость интегральных полупроводниковых микросхем к воздействию тяжелых заряженных частиц .....	237
С.П. МОРЕВ, А.Н. ДАРМАЕВ, Д.А. КОМАРОВ, К.В. КУЗЬМИЧ, С.П. МАСЛЕННИКОВ, Э.К. МУРАВЬЕВ, В.М. САБЛИН	
О возможности применения автоэмиссионных структур в качестве источников тока в вакуумных СВЧ приборах .....	239
А.О. МОРОЗОВ, О.А. МОРОЗОВ, В.П. ТРЕБУХ, А.С. БРИЕНКОВ, А.В. ПРОКОПЕНКО	
Разработка микроволновой установки для эффективной обработки минеральных материалов .....	241
А.О. МОРОЗОВ, О.А. МОРОЗОВ, В.П. ТРЕБУХ, А.В. ПРОКОПЕНКО	
Разработка микроволновой установки для дефростации минерального сырья .....	243
А.О. НЕСТЕРЕНКО, Д.Э. ЭРГАШЕВ	
Методы обработки результатов аэрогаммасъемки и сложности, связанные с их применением .....	245
М.В. ПРОКУРОНОВ, В.Д. СЕВАСТЬЯНОВ, Р.М. ШИБАЕВ, А.В. ЯНУШЕВИЧ	
Исследование возможности построения интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников смешанного быстрого нейтронного и гамма-излучения .....	247
Р.С. РАЧКОВ, И.Г. БУСАЙД, С.Э. ШОЛЕНИНОВ	
Защита ФЭУ в блоках детектирования скважинной аппаратуры от магнитных полей .....	250
М.А. САМОЙЛОВА, А.А. ИВАНОВ, С.Б. ЧЕБЫШОВ	
Испытания устройства для мониторинга объемной активности инертных радиоактивных газов .....	252
А.В. САХАРОВСКИЙ, М.П. ВИКУЛИН, А.С. ДОЛОТОВ, П.И. КОНОВАЛОВ, А.Б. ПОПУГАЕВ, А.Ю. СОКОЛОВ, А.В. ШЕВЧИК	

Хронографический электронно-оптический преобразователь для видимого и ближнего ИК-диапазона .....	254
А.С. СЕРЕБРЯКОВА, С.П. МАСЛЕННИКОВ	
Импульсный твердотельный генератор для стенда динамических испытаний безнакальных магнетронов .....	256
С.В. СЫРОМУКОВ, Р.В. ДОБРОВ, В.В. СТЕПНОВ, В.И. СЫСОЕВ, А.Н. СТАРОСТИН	
Генератор нейтронов НГ-24 для ядерных технологий .....	258
Е.М. ТЮРИН, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, И.В. УРУПА	
Спектрометрия быстрых нейтронов детекторами на основе поликристаллического алмаза .....	260
С.Б. ЧЕБЫШОВ, Р.А. НАСИБУЛЛИН, А.С. ГОРДЕЕВ	
Оценка возможности применения беспроводных технологий IoT при построении системы мониторинга параметров промышленных объектов на базе стандарта LoRaWAN .....	262
С.Б. ЧЕБЫШОВ, И.И. ЧЕРКАШИН, В.И. КАЛИН, А.В. КАЛИН	
Блок детектирования для измерения объемной активности инертных радиоактивных газов .....	264
В.Ю. ШАЛАМОВА, А.А. ИВАНОВ	
Измерение объемной активности паров I-131 в присутствии инертных радиоактивных газов на объектах использования атомной энергии .	266

### Секция ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ, А.М. САГИТОВА, Д.В. СИНИЦЫН	
Импульсно-периодический щелевой CO <sub>2</sub> -лазер с ВЧ-накачкой и активной синхронизацией мод .....	269
К.А. ПОЛЕВОВ, Ю.Л. КОПЫЛОВ, А.Л. КОРОМЫСЛОВ, К.В. ЛОПУХИН, И.М. ТУПИЦЫН, Е.А. ЧЕШЕВ	
Отечественная композитная керамика Nd <sup>3+</sup> :YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG .....	271
А.А. ВОЗНЕСЕНСКАЯ, Д.А. КОЧУЕВ, А.В. КИРЕЕВ, А.В. ЖДАНОВ, А.С. РАЗНОСЧИКОВ	
Селективное лазерное плавление порошков жаропрочных сталей .....	274
А.А. УШАКОВ, П.А. ЧИЖОВ, Н.А. ПАНОВ, Д.Е. ШИПИЛО, В.В. БУКИН, О.Г. КОСАРЕВА, С.В. ГАРНОВ, А.Б. САВЕЛЬБЕВ	

Изучение свойств терагерцевого излучения, распространяющегося в обратном направлении из двухчастотной лазерно-индуцированной плазмы .....	276
<b>П.А. ПАЛКИН, А.Б. ЛЮХТЕР, А.В. ЗАВИТКОВ</b>	
Опыт отработки технологии лазерной наплавки порошковых материалов .....	279
<b>А.В. ПЕНТО, А.Р. МУХАМАТНУРОВА, И.И. КУЗЬМИН</b>	
Десорбция ионов органических соединений с наноструктурированной поверхности кремния импульсным лазерным излучением длин волн 351 нм и 263 нм .....	282
<b>А.И. СИДОРОВ, А.Б. БУХАРИНА, А.В. ПЕНТО</b>	
Масс-спектрометрический анализ спиртов с ионизацией излучением лазерной плазмы при атмосферном давлении в газах .....	284
<b>А.Р. МУХАМАТНУРОВА, А.В. ПЕНТО, И.И. КУЗЬМИН</b>	
Масс-спектрометр с двухимпульсной двухчастотной лазерной десорбцией ионов органических соединений с наноструктурированной поверхности кремния .....	286
<b>А.С. ЩЕКИН, Д.В. ПАНОВ, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, К.Л. СЕРГЕЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.А. ИВАНОВ</b>	
Керамики AlN импульсно-периодическим Nd:YVO <sub>4</sub> лазером с длиной волны 532 нм для создания металлического проводящего слоя .....	288
<b>А.Т. СААКЯН, А.А. КОЛОГРИВОВ, Т.Т. КОНДРАТЕНКО, В.Н. ПУЗЫРЁВ, А.Н. СТАРОДУБ, А.А. ФРОНЯ, О.Ф. ЯКУШЕВ</b>	
Исследования гидродинамической эффективности лазерно-плазменного взаимодействия и пространственного рассеяния излучения плазмой на установке «КАНАЛ-2» .....	290
<b>В.П. БИРЮКОВ, В.В. ИСАКОВ, А.Ю. ФЕДОТОВ, Д.А. БАУЛИН</b>	
Влияние режимов лазерного упрочнения стали 40X на микротвердость и геометрические параметры зон закалки .....	292
<b>Л.И. БРЮКВИНА, Н.А. ИВАНОВ</b>	
Радиационно-химические преобразования лазерных центров окраски после низкотемпературного облучения кристаллов LiF:OH, Mg .....	294
<b>В.А. ХОХЛОВ, Н.А. ИНОГАМОВ, В.В. ЖАХОВСКИЙ, Ю.В. ПЕТРОВ</b>	
Физические процессы при лазерной абляции в жидкость и при лазерном ударно-волновом пиннинге .....	296
<b>В.Б. ПАРФЕНТЬЕВА, А.Д. ЗВЕРЕВ, В.А. КАМЫНИН, А.И. ТРИКШЕВ, В.Г. ВОРОНИН</b>	
Оптимизация волоконных интерферометров с помощью импульсных лазеров и суперлюминесцентных волоконных источников широкополосного излучения .....	298

Д.В. ПАНОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.О. АНДРЕЕВ, Д.В. УШАКОВ, П.С. ДЖУМАЕВ, В.И. ПОЛЬСКИЙ	
Исследование микроструктуры диоксида циркония и дисиликата лития при обработке ультракороткими лазерными импульсами .....	300
В.О. ПОДУСОВСКИЙ, И.С. ЛОГИНОВА, А.Н. СОЛОНИН, А.М. ХАЛИЛ	
Влияние Ti и В на формирование структуры в сплаве AA7020 в условиях лазерной обработки .....	302
В.П. БИРЮКОВ, Т.А. БАЗЛОВА	
Лазерная наплавка медных сплавов на сталь .....	304
В.П. ГОРДЕЕВ, В.В. БЕЗОТОСНЫЙ, В.А. ОЛЕЩЕНКО	
Моделирование механических напряжений в непрерывных лазерных диодных линейках .....	306
С.В. ГЮНТЕР, А.А. САПРЫКИН, Е.А. ИБРАГИМОВ, А.А. КЛОПОТОВ, А.И. ПОТЕКАЕВ, Е.С. МАРЧЕНКО, Ю.Ф. ЯСЕНЧУК	
Особенности лазерной сварки тонкой проволоки из сплава на основе никелида титана .....	308
Д.В. ПАНОВ, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, Э.Д. ИШКНЯЕВ, К.Л. СЕРГЕЕВ	
Создание гидрофобных поверхностей на стали лазером с наносекундной длительностью импульса .....	311
Д.В. СИМАНОВСКИЙ, Т.И. ОВСЕЦИНА, П.В. АНДРЕЕВ, А.Л. МУРГИН, А.Е. ЕГОРОВА, В.А. ИВАНОВ	
Получение и параметры монокристаллов $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{GeO}_4)_3$ .....	313
Д.И. ГАВРИЛОВ, А.Ю. МАРЧЕНКОВ, А.Б. ЛЮХТЕР, К.В. СКВОРЦОВ	
Апробация методики безобразцового контроля механических свойств сварного соединения разнородных сталей .....	315
Б.А. ДЕМИДОВ, Е.Д. КАЗАКОВ, Ю.Г. КАЛИНИН, Д.И. КРУТИКОВ, А.А. КУРИЛО, М.Г. СТРИЖАКОВ, А.Ю. ШАШКОВ	
Применение лазерного зондирования для исследования плазменных процессов и распространения ударных волн в прозрачных материалах .....	317
Е.Ю. ЗАРУБИНА, Е.Ю. СОЛОМАТИНА, В.М. ИЗГОРОДИН, Е.И. ОСЕТРОВ, А.П. ПЕПЕЛЯЕВ	
Диагностика криогенного слоя изотопов водорода в сферической оболочке по теневым изображениям .....	320
А.А. ГОРДЕЕВ, В.Ф. ЕФИМКОВ, И.Г. ЗУБАРЕВ, С.И. МИХАЙЛОВ	
Наблюдение вынужденного температурного рассеяния света при нестационарном взаимодействии лазерного импульса со средой .....	322
И.С. ПЕЧНИКОВ, А.Б. ЛЮХТЕР, А.Н. ГОЦ	
Термоупрочнение внутренней поверхности цилиндра ДВС излучением иттербиевого волоконного лазера .....	325

А.В. ИВАЩЕНКО, Д.А. КОЧУЕВ, А.Ф. ГАЛКИН, К.С. ХОРЬ-КОВ, М.А. ТАРАСОВА

Оценка концентрации свободных электронов в плазменном канале, индуцированном фемтосекундным лазерным излучением ..... 327

К.Л. СЕРГЕЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, А.С. ЩЕКИН, Д.В. ПАНОВ

Исследование влияния излучения волоконного лазера на модификацию износостойкой поверхности на основе хрома, полученной методом магнетронного напыления ..... 330

М.И. КАЗЬМИН, Т.В. КАЗИЕВА

Спекл-интерферометрия для анализа микроциркуляции крови ..... 332

С.Ф.КОВАЛЁВА, А.С.ТИЩЕНКО, Д.О.ЗАМУРАЕВ, А.Л.ШАМРАЕВ, Д.С.ГАВРИЛОВ.

Генерация предимпульсов в многопроходных лазерных усилителях ..... 334

А.В. КОЛЧИН, Д.В. ШУЛЕЙКО, А.В. ПАВЛИКОВ, С.В. ЗАБОТНОВ, В.А. ВОЛОДИН, А.А. ПОПОВ

Фемтосекундный лазерный отжиг тонких пленок аморфного германия и структур германий/кремний ..... 336

Ю.В. КОЧЕТКОВ, Ф.А. КОРНЕЕВ, В.В. СТЕПАНИЩЕВ, А.П. КУЗНЕЦОВ, Т. ПИСАРЧУК, М. КРУЗ

Диагностика спонтанного магнитного поля в лазерной плазме ..... 338

С.В. КУЗНЕЦОВ

Механизм генерации сгустков электронов при прохождении лазерного импульса ультрарелятивистской интенсивности через резкую границу плазмы ..... 340

С.Л. ЛЕЩЕНКО, Д.В. ПОПОВ

Метод дистанционного авиационного зондирования атмосферы для поиска залежей углеводородного сырья ..... 342

О.Г. ДЕВОЙНО, Н.И. ЛУЦКО, А.С. ЛАПКОВСКИЙ

Микротвердость фаз мультимодального покрытия, нанесенного лазерной наплавкой ..... 345

М. А. ТАРАСОВА, Д. А. КОЧУЕВ, А.Ф. ГАЛКИН,

С.В. ЖИРНОВА, А. В. ИВАЩЕНКО

Исследование процесса филаментации фемтосекундного лазерного излучения и структурных изменений кварцевого стекла ..... 347

М.В. ПОНАРИНА, А.Г. ОХРИМЧУК, М.П. СМАЕВ, М.Г. РЫБИН, Е.Д. ОБРАЗЦОВА, Т.В. ДОЛМАТОВ, В.В. БУКИН, И.В. ЖЛУКТОВА, В.А. КАМЫНИН, П.А. ОБРАЗЦОВ

Двухволновая генерация пикосекундных импульсов в волноводном ND:YAG лазере с использованием графена ..... 350

Е.И. МАРЕЕВ, Е.А. МИГАЛЬ, Ф.В. ПОТЕМКИН, Картирование лазерно-индуцированной микроплазмы методикой генерации третьей гармоники .....	352
Е.И. МАРЕЕВ, В.А. АЛЕШКЕВИЧ, Ф.В. ПОТЕМКИН, Н.В.МИНАЕВ, В.М.ГОРДИЕНКО Генерация суперконтинуума фемтосекундными лазерными импульсами при филаментации в сверхкритическом $\text{CO}_2$ в окрестности линии Видома .....	354
В.В. ШЕПЕЛЕВ, Н.А. ИНОГАМОВ, С.В. ФОРТОВА Механизмы лазерного пробивания тонких металлических пленок .....	356
Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, А.В. ГОРШКОВА Технология лазерной микрофрезировки как ключ к быстрому прототипированию керамических МЭМС-устройств .....	358
О.А. ЗОРИНА, А.В. КОРШУНОВА, Н.Н. САМОТАЕВ, Е.В. ОСИПОВ Оценка воздействия фотосенсибилизатора «ГЕЛЕОФОР» при аппликации в тканях зубов .....	360
Е.И. ОСЕТРОВ, В.М. ИЗГОРОДИН, Е.Ю. СОЛОМАТИНА, А.П. ПЕПЕЛЯЕВ, Е.Ю. ЗАРУБИНА, С.Ю. БАТУКОВ, С.П. БАРИНОВ, А.А. КОСТРИКИНА Эксперименты по выравниванию криогенного слоя дейтерия по толщине ИК-излучением .....	362
П.А. ПАЛКИН А.Б. ЛЮХТЕР Технология сварки алюминиевых сплавов 7000-й серии излучением иттербиевого волоконного лазера .....	364
Р.Д. ГЛУХОВ, Т.В. КАЗИЕВА, А.П. КУЗНЕЦОВ, К.Л. ГУБСКИЙ Разработка системы для калибровки твердомеров, основанных на методе либа .....	366
С.А. СУББОТИН, Н.С. ВОРОНОВА, Ю.Е. ЛОЗОВИК Гидродинамика холодной экситонной сверхтекучей жидкости .....	368
С.Б. ДОНАЕВ, Б.Е. УМИРЗАКОВ Эмиссионные свойства сплава Pd–Ba, активированного лазерным облучением .....	370
Т.А. СЕМЕНОВ, И.А. ЖВАНИЯ, М.С. ДЖИДЖОЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО Регистрация анизотропии выхода рентгеновского излучения из субрелятивистской лазерно-кластерной наноплазмы .....	373
Т.Т. КОНДРАТЕНКО, М.Н. ДМИТРИЕВА, П.В. МАКСИМОВ, В.Н. ПУЗЫРЁВ, А.Т. СААКЯН, А.Н. СТАРОДУБ Трубчатый активный элемент твердотельного квантового генератора и способ его накачки .....	375

И.Ю. ТИЩЕНКО, К.Л. ГУБСКИЙ, В.А. ПИРОГ, Г.М. ОЛЕЙНИК, А.В. БРАНИЦКИЙ, Я.Н. ЛАУХИН, И.Н. ФРОЛОВ, А.П. КУЗНЕЦОВ Лазерный измерительный комплекс для измерения скорости лайнера, ускоряемого магнитным полем на установке АНГАРА-5-1 .....	377
П.П. ТРОХИМЧУК Некоторые проблемы моделирования ударных процессов релаксационной оптики .....	379
А.А. ФРОЛОВ Излучение терагерцовых волн при взаимодействии встречных лазерных импульсов в плазме .....	381
Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, В.И. ПОЛЬСКИЙ, П.С. ДЖУМАЕВ, К.Л. СЕРГЕЕВ, А.С. ЩЕКИН, Д.В. ПАНОВ Исследование механических характеристик образцов из нержавеющей стали, полученных методом прямого лазерного выращивания .....	383
О.Г. ДЕВОЙНО, А.П. ПИЛИПЧУК Способ представления распределения интенсивности лазерного излучения при моделирования процесса нагрева .....	387

**Секция**

**УПРАВЛЯЕМЫЙ  
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ**

Руководитель секции

– Курнаев В.А., д.ф.-м.н.,  
профессор кафедры № 21

Секретарь секции

– Кирко Д.Л., к.ф.-м.н.,  
доцент кафедры №21

Тел. : 8 (495) 788-56-99, доб. 9321

E-mail: VAKurnaev@mephi.ru, DLKirko@mephi.ru

О.С. БЕЛОЗЕРОВ, Ю.Л. БАКШАЕВ, С.А. ДАНЬКО

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва,  
Россия*

## **ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ И ЭКСПЕРИМЕНТ ПО УСКОРЕНИЮ ИОНОВ В ГЕНЕРАТОРЕ РЭП «КАЛЬМАР»**

Эксперименты по ускорению ионов в амбиполярном поле проведены на генераторе РЭП «Кальмар» (напряжение в импульсе  $\sim 250$  кВ, ток  $\sim 40$  кА, длительность импульса  $\sim 150$  нс). С помощью разработанных методик были измерены потоки ионов и определены некоторые их свойства. В проведённых экспериментах максимальную энергию 6.1 МэВ приобретали самые тяжёлые частицы из присутствующих в тонкой анодной плёнке – ионы алюминия. Максимальная энергия, которую набирали протоны, составила  $\sim 800$  кэВ. Значение полной энергии, переносимой ионами, изменялось от 0.07 до 0.35 Дж, угловая расходимость пучков составляла от  $1.2^\circ$  до  $2.2^\circ$ .

O.S. BELOZEROV, Yu.L. BAKSHAYEV, S.A. DAN'KO

*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

## **DIAGNOSTIC TECHNIQUES AND EXPERIMENT ON THE ACCELERATION OF IONS IN THE GENERATOR REP «KALMAR»**

Experiments on the acceleration of ions in the ambipolar field were carried out on a Kalmar generator (voltage per pulse  $\sim 250$  kV, current  $\sim 40$  kA, pulse duration  $\sim 150$  ns). Using the developed techniques, ion fluxes were measured and some of their properties were determined. In the experiments performed, the maximum energy of 6.1 MeV was acquired by the heaviest particles present in the thin anode film, aluminum ions. The maximum energy that the protons gained was  $\sim 800$  keV. The value of the total energy transferred by the ions varied from 0.07 to 0.35 J, the angular divergence of the beams ranged from  $1.2^\circ$  to  $2.2^\circ$ .

В импульсных генераторах релятивистских электронных пучков (РЭП), воздействующих на прозрачную для них нагрузку, существует явление ускорения ионов под действием возникающего амбиполярного поля [[1, 2]. Ионы ускоряются в направлении виртуального катода, создаваемого прошедшими сквозь анод релятивистскими электронами. В этом режиме амбиполярного ускорения энергия ионов может в несколько раз превышать приложенное напряжение импульсного генератора, умноженное на ионный заряд. Технология амбиполярного ускорения может иметь существенные преимущества перед традиционными методами, такими как циклические ускорители заряженных частиц.

Эксперименты по ускорению ионов в амбиполярном поле проведены на генераторе «Кальмар» (напряжение в импульсе ~250 кВ, ток ~ 40 кА, длительность импульса ~ 150 нс).

Для исследования эффективности генерации ионных пучков мегаэлектрон-вольтных энергий использовались следующие методы диагностики. Энергия отдельных ионов определялась времяпролётной методикой путем измерения скорости их движения на известной базе. Для измерения полной энергии пучков заряженных частиц и распределения плотности энергии в поперечном сечении применялся калориметрический метод. Камера-обскуры позволяла измерить плотность тока электронов на анодной фольге, на которую воздействует электронный пучок.

По скорости ионов и их проникающей способности установлено, что в высоковольтном диоде генератора создаются условия для ускорения ионов всех сортов атомов, составляющих анодную плёнку. Эти условия могут создаваться как на переднем фронте основного импульса мощности генератора, так и в любой другой момент рабочего полупериода в зависимости от наличия предимпульса. Установлено, что максимальную в эксперименте энергию 6.1 МэВ приобретают самые тяжёлые из присутствующих частиц – ионы алюминия. Протоны набирали максимальную энергию ~800 кэВ. Энергия отдельных ионов, идущих в направлении ~20°, оказалась меньше примерно на 15%, чем энергия осевых ионов. К.п.д. в фазе ускорения ионов, который можно оценить по измеренной тепловизором энергии ионов, доходит до 10 % от электрической энергии в диоде генератора.

Значение энергии, переносимое ионами и измеренное тепловизором, составляло от 0.07 до 0.35 Дж, а угловая расходимость – от 1.2 до 2.2°. Полное количество ускоренных ионов в пересчёте на 1 МэВ-ные составило ~10<sup>12</sup> частиц в пуске.

Авторы выражают благодарность РФФИ за частичную поддержку исследований грантами №17-02-00441а и №18-32-00199мол\_а.

#### *Список литературы*

1. Горбулин Ю. М., Данько С. А., Калинин Ю. Г., Скорюпин В. А. Шестаков Ю. И., Яньков В. В. Физика плазмы, **6**, 109, 1980.
2. Дубинов А. Е., Корнилова И. Ю., Селемир В. Д. УФН, **172**, 1225, 2002.

**К.В. БРУШЛИНСКИЙ**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РАСЧЕТЫ В ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИХ И ПЛАЗМОСТАТИЧЕСКИХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ**

Доклад предполагает обзор математических моделей и численных исследований двух типов задач: о стационарных течениях плазмы в коаксиальных каналах плазменных ускорителей и о равновесии плазмы в магнитных ловушках. Модели основаны на уравнениях магнитной газодинамики. Результаты расчетов способствовали разработке ускорителя большой мощности и ловушек-галатей с погруженными в плазму проводниками с током.

**K.V. BRUSHLINSKII**

*Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## **MATHEMATICAL MODELS AND COMPUTATIONS IN PLASMADYNAMIC AND PLASMASTATIC PROBLEMS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY**

The lecture presents a review of mathematical models and computer simulations in two types of problems: on steady-state plasma flows in coaxial channels of plasma accelerators and on plasma equilibrium in magnetic traps. The models are based on the MHD equations. The computation results promoted the elaboration of a high-powerful plasma accelerator and of some galatea-traps with current carrying conductors immersed into the plasma.

Интенсивное развитие физики плазмы с середины XX века и до наших дней вызвано всеобщим интересом к заманчивой перспективе получить энергию управляемого термоядерного синтеза и увлекательными проблемами астрофизики. Этот интерес распространился и на область новой техники, где возникли перспективы для приложений плазменных установок. Одну из групп методов исследования физических процессов в плазме составляют их математические модели и расчеты с привлечением современной высокопроизводительной вычислительной техники.

В докладе представлены примеры численных моделей и результатов расчетов в актуальных разработках коаксиальных плазменных ускорителей и равновесных плазменных конфигураций в ловушках для

удержания плазмы магнитным полем. Идея обеих установок принадлежит выдающемуся советскому физика А.И. Морозову (1928-2009).

Плазмодинамические модели описывают динамику плазмы в каналах-соплах, образованных двумя коаксиальными электродами, радиальный ток между которыми, взаимодействуя с азимутальным магнитным полем, ускоряет плазму в осевом направлении. Математический аппарат моделей – уравнения магнитной газодинамики (МГД). Численные решения больших серий задач с ними внесли вклад в теорию МГД-аналога сопла Лавалья и способствовали успешной разработке и созданию квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя (КСПУ).

Плазмостатические модели созданы для исследования равновесных магнитных плазменных конфигураций в тороидальных ловушках-галатеех с погруженными в плазму проводниками с током. Основные свойства и закономерности рассмотрены с помощью их распрямленных в цилиндр аналогов, а затем уточнены поправки, связанные с тороидальной геометрией. Модели опять используют МГД-приближение. Равновесие плазмы в предположении симметрии ловушек описывается в терминах краевых задач со скалярным двумерным полулинейным эллиптическим уравнением Грэда-Шафранова для функции потока магнитного поля. В расчетах приведены результаты исследования цилиндрических аналогов ловушек «Пояс» и «Стелларатор-галатее» (СГ). Показано, что ловушки с фиксированным значением электрического тока в проводниках способны удерживать плазму лишь при установленном ограничении на ее давление. На примере СГ проиллюстрировано преимущество геометрии галатее с плазмой, расположенной вдоль сепаратрисы магнитного поля, по сравнению с вариантом ее сосредоточения вдоль оси цилиндра, что соответствовало бы традиционному стелларатору.

С обсуждаемыми в докладе вопросами можно ознакомиться более подробно в монографиях [1, 2] и работах последнего времени [3-5] с обширной библиографией.

#### *Список литературы*

1. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. 2-е изд. –М.: Физматлит, 2008. –616 с.
2. Брушлинский К.В. Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. – 200 с.
3. Брушлинский К.В., Жданова Н.С., Стёпин Е.В. // ЖВМиМФ. 2018. Т. 58. № 4. С. 607-617.
4. Брушлинский К.В., Кондратьев И.А. // Матем. моделирование. 2018. Т. 30. № 6. С. 76-94

Г.В. ДОЛГОЛЕВА

*Московский Государственный Университет*

## **СЖАТИЕ И ГОРЕНИЕ МИШЕНЕЙ ПРИ УЧЕТЕ ПЕРЕНОСА БЫСТРЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Проблема рождения и переноса заряженных частиц, возникающих в результате термоядерных реакций в горячей дейтериево- тритиевой плазме, очень существенна. Цель работы - рассмотрение влияния переноса заряженных частиц-продуктов термоядерных реакций на параметры микромишеней в лазерном и термоядерном синтезе на примерах опубликованных мишеней.

G.V. DOLGOLEVA

*Moscow State University*

## **COMPRESSION AND COMBUSTION OF TARGETS IN THE ACCOUNT OF TRANSFER OF QUICK CHARGED PARTICLES**

The problem of the creation and transfer of charged particles arising as a result of thermonuclear reactions in a burning deuterium-tritium plasma is very important. The purpose of this paper is to consider the effect of the transfer of charged particles-the products of thermonuclear reactions on the parameters of micromirrors in laser and thermonuclear synthesis using examples of published targets.

Проблема рождения и переноса заряженных частиц, возникающих в результате термоядерных реакций в горячей дейтериево- тритиевой плазме, очень существенна. Часто расчет горения мишени проводится в приближении локального выделения энергии быстрыми заряженными частицами, т.е. частица отдает свою энергию в той же точке пространства, в которой она возникла. Однако, в условиях, когда запасы по зажиганию мишеней малы, при определении параметров мишени важно точно отразить в модели, где и как заряженные частицы отдают свою энергию, т. е. рассчитать нестационарный перенос энергии быстрыми заряженными частицами- продуктами термоядерных реакций.

На первый взгляд кажется, что учет переноса быстрых заряженных частиц в мишени должен уменьшить энерговыделение в DT области, так как часть частиц переносится в соседнюю с DT область и не участвуют в процессе "горения" мишени. Тем самым уменьшается выход термоядерной энергии. Естественно уменьшается коэффициент усиления мишени (отношение выделившейся термоядерной энергии к вложенной в мишень энергии). Проведенное численное исследование показало, что

это не всегда так. Энергия, выносимая частицами из DT - области, "оседает" в соседней с ней области. В ней увеличивается энергия, давление, и тем самым сдерживается разлет DT области, увеличивается время горения DT-газа и выход термоядерной энергии.

Тема исследования переноса энергии заряженными термоядерными частицами в сжатых лазерных мишенях не нова, можно назвать авторов работ [1-3].

Цель данной работы- рассмотрение влияния переноса заряженных частиц на параметры микромишеней на примерах опубликованных мишеней в лазерном и тяжелоионном синтезе.

Показано, что перенос быстрых заряженных частиц может, как уменьшать, так и увеличивать энерговыделение в DT - области в зависимости от вида энерговложения и доли энергии переносимой в соседнюю с DT область.

Все вычислительные эксперименты проведены по методике, ориентированной на численное исследование физических процессов, протекающих в лазерной плазме [4].

Перенос быстрых заряженных частиц рассчитывается в многогрупповом диффузионном приближении.

#### *Список литературы*

1. Выговский О. Б., Ильин Д. А., Левковский А. А., Розанов В. Б., Шерман В. Е. Торможение быстрых заряженных частиц в идеальной плазме с произвольной степенью вырождения. Препринт №72. М.: ФИАН, 1990.
2. П.В. Конаш, А.И. Лебо, И.Г. Лебо Моделирование переноса энергии заряженными термоядерными частицами в сжатых лазерных мишенях с учетом спонтанных магнитных полей. Математическое моделирование, т. 25, 3-14. 2013.
3. Бельков С.А., Долголева Г.В., Ермолович В.Ф. Исследование влияния переноса быстрых заряженных частиц на горение термоядерных мишеней // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 1. С. 51-55.
4. Долголева Г.В. Методика расчета движения двух температурного излучающего газа (Программа СНД) // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983. Вып. 2/13/. С. 29-33.

А.Б. КУКУШКИН<sup>1,2</sup>, М.Г. ЛЕВАШОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

## **ВКЛАД ЭФФЕКТА ХОЛЛА В РАДИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И СПОНТАННОЕ ВРАЩЕНИЕ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА**

Показано, что эффект Холла в плазме, дефинируемый как разделение электрических зарядов противоположного знака при их движении в магнитном поле, может давать существенный вклад в наблюдаемое отрицательное радиальное электрическое поле  $E_r$  в центральной части плазменного шнура и, соответственно, спонтанное вращение плазмы в токамаках. Указан простой способ определения вклада эффекта Холла в наблюдаемую величину  $E_r$  по независимо измеренным пространственным распределениям электронного давления, магнитного поля и скорости вращения плазмы. Применение этой процедуры к измерениям на токамаках ТМ-4 и Т-10 дает высокие отрицательные значения  $E_r$  в центральной плазме (~ несколько сотен В/см), которые находятся в качественном согласии с измеренными значениями (~ 100 В/см). Результаты показывают, что вклад других механизмов (например, неоклассической кинетики) следует рассматривать в рамках двухжидкостной магнитной гидродинамики.

А.Б. KUKUSHKIN<sup>1,2</sup>, M.G. LEVASHOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

## **CONTRIBUTION OF THE HALL EFFECT TO RADIAL ELECTRIC FIELD AND SPONTANEOUS/INTRINSIC ROTATION IN TOKAMAK CORE PLASMAS**

The Hall effect, defined as the separation of electric charges of opposite sign when they move in a magnetic field, is suggested to contribute substantially to the observed negative radial electric field  $E_r$  in the core plasma in tokamaks and, respectively, to the spontaneous/intrinsic rotation of plasma. A simple way to evaluate the Hall effect contribution to the  $E_r$  value, using the independently measured space distributions of electron pressure, magnetic field, and plasma rotation velocity, is suggested. Application of this procedure to experimental data from the TM-4 and T-10 tokamaks yields high negative values of  $E_r$  in the core plasma (~ few hundreds of 100 V/cm) which are in qualitative agreement with measured values (~ 100 V/cm). The results suggest that the contribution of other mechanisms (e.g., neoclassical kinetics) should be treated in the framework of the two-fluid magnetohydrodynamics.

Детальное исследование роли эффекта Холла в плазме началось с изучения в [1] — в рамках двухжидкостной магнитной гидродинамики (МГД) — эффекта вмороженности магнитного поля преимущественно в электронную компоненту плазмы. Этот эффект важен для стационарных течений плазмы (см. обзор [2]), и он играет доминирующую роль в быстрых процессах в плазме (плазменные размыкатели тока, магнитоинерционное удержание плазмы в импульсных разрядах, напр., Z-пинчах) и широко исследован в литературе (см. напр., обзор [3]). В описании  $E_r$  в токамаках доминирует подход, при котором равновесие плазмы описывается одножидкостной МГД, а уравнение равновесия для ионов используется для определения радиального электрического поля (пока неизвестного происхождения) по измеренным значениям давления ионов и тороидальных и полоидальных скоростей вращения. Отсутствие должной «ставки» на уравнение силового равновесия для электронов приводит к недооценке роли эффекта Холла.

В двухжидкостной МГД полоидальное магнитное поле в плазме токамака сжимает только плазменные электроны (сжатие тороидальным электрическим током, пинч-эффект), и это разделение электрических зарядов приводит к образованию в центральной части плазменного шнура отрицательного радиального электрического поля  $E_r$ . Появление этого поля, в свою очередь, создает «спонтанное» вращение плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Оценки вклада эффекта Холла в наблюдаемую величину  $E_r$ , использующие измерения электронного давления и скорости вращения плазмы в токамаках ТМ-4 [4] и Т-10 [5, 6], а также реалистичные расчетные профили тока, дают высокие отрицательные значения  $E_r$  в центральной плазме (~ несколько сотен В/см), которые находятся в качественном согласии с измеренными значениями (~ 100 В/см). Результаты показывают, что вклад других механизмов (например, неоклассической кинетики) в  $E_r$  и спонтанное вращение плазмы в токамаках следует рассматривать в рамках двухжидкостной магнитной гидродинамики.

#### *Список литературы*

1. Морозов А.И., Шубин А.П. // ЖЭТФ. 1964. Т. 46. С. 710.
2. Морозов А.И., Соловьев Л.С. // Вопросы теории плазмы / Под ред. акад. М.А.Леонтовича. 1974. Вып. 8. С. 3.
3. Кингсеп А.С., Чукбар К.В., Яньков В.В. // Вопросы теории плазмы / Под ред. акад. Б.Б.Кадомцева. 1987. Вып. 16. С. 209.
4. Bugaria V.I., et al // Nucl. Fusion 1985 25 1707
5. Melnikov A.V., et al // Nucl. Fusion 2013 53 093019
6. Melnikov A.V. et al // Problems At. Sci. Technol., Ser. Plasma Phys. 2010 16 40

В.А. ЛЫКОВ, Е.С. БАКУРКИНА, Н.Г. КАРЛЫХАНОВ,  
Г.Н. РЫКОВАНОВ, И.А. ХИМИЧ и В.Е. ЧЕРНЯКОВ

*РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск*

## **РАСЧЕТЫ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МЕГАДЖОУЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ИЗЛУЧЕНИЕМ ВО 2<sup>ОЙ</sup> И 3<sup>ЕЙ</sup> ГАРМОНИКАХ ND-ЛАЗЕРА**

Представлены результаты одномерных расчетов криогенных мишеней прямого облучения с CH- и SiO<sub>2</sub> - абляторами для мегаджоульных установок с излучением во 2-ой и 3-ей гармониках Nd-лазера.

V.A. LYKOV, E.S. BAKURKINA, V.E. CHERNYAKOV,  
N.G. KARLYKHANOV, I.A. KHMICH AND G.N. RYKOVANOV

*FSUE "RFNC-VNIITF named after academician E.I. Zababakhin", Snezhinsk*

## **THE CALCULATIONS OF DIRECT – DRIVE TARGETS FOR MEGAJoule LASER FACILITIES WITH RADIATION IN 2<sup>ND</sup> AND 3<sup>RD</sup> HARMONICS OF THE ND-LASER**

The results of 1D - simulations of direct-drive targets with CH- and SiO<sub>2</sub> - ablators for megajoule laser facilities with radiation in 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> harmonics of the Nd-laser are presented.

Представлены результаты расчетов криогенных мишеней прямого облучения для мегаджоульных установок с излучением во 2-ой и 3-ей гармониках Nd-лазера. Отправными точками для оптимизации явились конструкции мишеней, предложенные в работах [1, 2]. Расчеты приводились по одномерной программе радиационной газовой динамики ЭРА [3] с учетом нелокального электронного теплопереноса [4] и моделью поглощения лазерного излучения [5], которая учитывала вынужденное Бриллюэновское рассеяние (ВРМБ), генерацию быстрых электронов в процессах двухплазмонного распада (ДПР) и вынужденного Рамановского рассеяния (ВРР). В качестве целевой функции при оптимизации мишеней взят запас по зажиганию ( $W_Q$ ), который аналогичен опубликованному в [6,7] и находится по профилям газодинамических величин из расчета без учета вклада продуктов термоядерных реакций в нагрев ДТ - топлива согласно формуле:

$$W_Q \approx (n-1) \int_0^{t^*} \frac{dQ_{т.я.} / dt}{E + Q} dt,$$

где:  $dQ_{т.я.}/dt$  - скорость нагрева топлива продуктами ДТ-реакции;  $E$  - внутренняя энергия,  $Q$  - потери энергии на теплопроводность и излучение из «горячего пятна» мишени,  $n$  - показатель степени при аппроксимации скорости ДТ-реакции степенной функцией температуры,  $t^*$ -момент максимального сжатия топлива.

Проведенные расчеты показали, что ВРМБ и разогрев мишени быстрыми электронами, возникающими в процессах ДПР и ВРР, катастрофически снижают  $W_Q$  мишеней с СН - аблятором [1] в случае использования лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 0,53$  мкм. Рассмотрена возможность уменьшения этих эффектов за счет перехода с пластикового аблятора на аблятор типа стекла и/или снижения плотности потока энергии лазерного излучения при увеличении аспектного отношения мишени. Запасы по зажиганию  $W_Q$  мишени [1] возрастают в  $\sim 2$  раза при увеличении аспектного отношения СН-оболочки в  $\sim 1,6$  раза с сохранением массы мишени и в  $\sim 7$  раз при переходе к мишени с аблятором из стекла [2]. Однако в обоих случаях они остаются существенно меньше 1 для лазерного излучения с  $\lambda = 0,53$  мкм. Запасы по зажиганию мишеней значительно возрастают при переходе со 2-ой на 3-ю гармонику излучения Nd-лазера.

Отмечается, что введение сдвига центра линий лазерного излучения в соседних каналах на  $\Delta\lambda \approx 10 - 20 \text{ \AA}$  может заметно снизить отражение лазерного излучения за счет ВРМБ и передачи энергии в пересекающихся лазерных пучках (СВЕТ [8]). Для этого случая получены запас по зажиганию  $W_Q \approx 1,7$  и выход термоядерной энергии  $\sim 50$  МДж в одномерном расчете мишени с аблятором из стекла [2] для энергии лазерной установки  $\sim 2$  МДж в излучении 3-ей гармоники Nd-лазера.

#### Список литературы

1. Бельков С.А., Бондаренко С.В., Вергунова Г.А. и др., ЖЭТФ **148** (4), 784 (2015).
2. Goncharov V. N., Sangster T.C., Boehly T.R., et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 165001 (2010).
3. Барышева Н.М., Зуев А.И. и др., Жур. Выч. Мат. и Мат. Физ., **22**, 401 (1982).
4. Batischev O.V., Vyuchenkov V.Yu., Detering F., et al, Phys. Plasmas **9**, 2302 (2002).
5. В.А.Лыков и др., XIII Международная конференция «Забабахинские научные чтения», 20-24 марта 2017г, Снежинск, Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, стр. 133 (www.vniitf.ru).
6. Вахрамеев Ю.С., Мохов В.Н. и Попов Н.А., **49** (2), 121-122 (1980).
7. Аврорин Е.Н., Феоктистов Л.П. и Шибаршов Л.И., Физика плазмы **6**, 965 (1980).
8. D. H. Edgell, et al., Phys. Plasmas., **24**, 062706 (2017).

V.V. КУЗЕНОВ<sup>1,2,3</sup>, С.В. РЫЖКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

<sup>2</sup> *Всероссийский НИИ автоматики имени Н.Л. Духова, Москва*

<sup>3</sup> *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ФАКЕЛА ВБЛИЗИ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ПРЕГРАДЫ**

Модель приповерхностного лазерного факела основана на уравнениях радиационной плазмодинамики, записанных в произвольных криволинейных координатах и методе расщепления по физическим процессам и пространственным направлениям, что в пространственно-гладком решении позволяет получить седьмой порядок точности. Численно исследованы радиационные и газодинамические процессы, возникающие в приповерхностной лазерной плазме под действием лазерного излучения на металлическую мишень. Проведены расчеты всех основных газодинамических и радиационных параметров лазерной горелки и металлического барьера. Представлены пространственные распределения и временная эволюция плазмы в определенные моменты времени.

V.V. KUZENOV<sup>1,2,3</sup>, S.V. RYZHKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Dukhov All-Russian Research Institute of Automatics, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *IPMech RAS, Moscow, Russia*

## **MATHEMATICAL MODELING OF MAIN PLASMA DYNAMIC CHARACTERISTICS IN THE LASER PLUME NEAR METAL TARGET**

The model of a near-surface laser torch is based on the equations of radiative plasmadynamics written in arbitrary curvilinear coordinates and splitting method in terms of physical processes and spatial directions, that in spatially smooth solution allows to get seventh order of accuracy. The radiation and gas-dynamic processes appearing in a near-surface laser plasma under the action of laser radiation on a metal target are numerically studied. Calculations of all the main gas-dynamic and radiative parameters of a laser torch and a metal barrier have been performed. The spatial distribution and time evolution of flare plasmas are studied and presented at certain times.

Вопросам взаимодействия лазерного излучения с конденсированными средами посвящена эта теоретическая работа. Приведены

пространственное распределение температуры в лазерном факеле на разные моменты времени и линии уровня магнитного давления [1-8]. Из распределений следует, что максимальное значение спонтанного магнитного поля возникает между контактной границей и ударной волной в области значительных градиентов температуры и плотности. Уровень значений импульса отдачи максимален на начальной стадии расширения.

Как показали выполненные расчеты, в импульсных струях плазмы, создаваемой импульсным воздействием лазерного излучения на плоскую металлическую преграду в газовой среде, на границе лазерной струи и невозмущенного газа (в отличие от плазменных струй создаваемых стационарным источником плазмы) отсутствует тороидальная по форме вихревая структура. Однако в целом характер течения в приосевой области соответствует натеканию струи плазмы на деформируемую газовую преграду: в этой области наблюдается структура, состоящая из двух ударных волн разделенных контактной границей.

На основе разработанной авторами математической модели приповерхностного лазерного факела, которая базируется на уравнениях радиационной плазмодинамики, записанных в произвольных криволинейных координатах, численно исследованы радиационные и газодинамические процессы, возникающие в приповерхностной лазерной плазме при воздействии на металлическую мишень излучения лазера. Произведены расчеты всех основных газодинамических и излучательных параметров лазерного факела и металлической преграды.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.5240.2017/8.9.

#### *Список литературы*

1. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Известия РАН. Серия Физическая. 2016. Т. 80, № 5. С. 659–663.
2. Ryzhkov S.V. // Sustainable Cities and Society. 2015. V. 14. P. 313–315.
3. Рыжков С.В. // Известия РАН. Серия Физическая. 2014. Т. 78, № 5. С. 647–653.
4. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 26–30.
5. Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Рыжков С.В. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 328 с.
6. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 9. С. 19–32.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 815. P. 012024.
8. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., K.V. Polyakov // Proc. 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). 2018. P. 46-50.

И.А. ХИМИЧ, Н.Г. КАРЛЫХАНОВ, В.А. ЛЫКОВ,  
Г.Н. РЫКОВАНОВ

*ФГУП РФЯЦ – ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, РФ.*

## **УМЕНЬШЕНИЕ ПЕРЕКАЧКИ ЭНЕРГИИ В ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКАХ ПРИ МНОЧАСТОТНОМ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Представлены результаты трехмерных расчетов поглощения лазерного излучения в сферической короне мишеней прямого облучения с учетом реальной геометрии их облучения на многолучевых лазерных установках. Показано, что потери энергии за счет передача энергии при пересечении пучков значительно уменьшаются при смещении длин волн в соседних лазерных пучках на  $\Delta\lambda = 10 - 20$  Å.

I.A. KHIMICH, N.G. KARLYKHANOV, V.A. LYKOV,  
G.N. RYKOVANOV

*FSUE "RFNC - VNIITF named after academician E.I. Zababihin", Snezhinsk, RF.*

## **MITIGATION OF CROSS-BEAM ENERGY TRANSFER AT MULTIFREQUENCY IRRADIATION OF DIRECT-DRIVE TARGETS**

Results of 3D - calculations of laser radiation absorption in the spherical corona of direct - drive targets with account for real geometry of target irradiation on multi-beam laser facilities are presented. It is shown, that energy losses specified by cross-beam energy transfer could be decreased considerably by a displacement of laser wavelength on  $\Delta\lambda = 10 - 20$  Å in the near laser beams.

Представлены результаты трехмерных расчетов поглощения лазерного излучения в сферической короне мишеней прямого облучения с учетом реальной геометрии облучения на многолучевых лазерных установках. В приближении геометрической оптики рассчитываются рефракция, обратно-тормозное поглощение лазерного излучения, а также передача энергии при пересечении пучков (cross-beam energy transfer – СВЕТ [1]). Для оценок процессов СВЕТ необходимы профили плотности, газодинамической скорости, температур электронов и ионов как функции эйлера радиуса. Соответствующие газодинамические профили берутся из одномерных расчетов, проводимых по программе ЭРА [2] с учетом нелокального электронного теплопереноса по модели [3]. Модель и

программа верифицированы как на тестовых задачах [4], так и экспериментальных данных [5], полученных при облучении оболочечных мишеней на 60-и лучевой лазерной установке OMEGA.

Проведены расчеты мишени прямого облучения из работы [6], которые показали, что процесс СВЕТ может снизить долю поглощенной мишенью лазерной энергии до 2-х раз в будущих экспериментах на 48-лучевой установке с энергией  $\sim 2$  МДж в излучении 2<sup>ой</sup> гармоники Nd-лазера.

В работе [7] было предложено уменьшить потери энергии, обусловленное процессом от СВЕТ, введением смещения длин волн излучения в лазерных пучках. Проведены расчеты со смещением длин волн излучения в соседних лазерных пучках для конфигурации облучения мишени из работы [6]. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Доля поглощенной лазерной энергии согласно расчетам, проведенных для мишени и геометрии ее облучения на 48-лучевой установке [6] с учетом СВЕТ при смещении длин волн излучения в соседних лазерных пучках

	$\Delta\lambda=0$	$\Delta\lambda=10 \text{ \AA}$	$\Delta\lambda=10, 20 \text{ \AA}$	Без СВЕТ
A, %	47	65	75	88

В первом столбце представлены результаты расчета поглощения лазерного излучения с учетом СВЕТ без смещения длин волн излучения в соседних лазерных пучках. Во втором столбце приведена доля поглощенной лазерной энергии с учетом СВЕТ, когда длины волн излучения в двух соседних пучках отличались на  $\Delta\lambda=10 \text{ \AA}$ . В третьем столбце - когда длины волн излучения отличались на  $10 \text{ \AA}$  и на  $20 \text{ \AA}$  в трех соседних пучках. Из таблицы 1 видно, что потери энергии за счет СВЕТ значительно уменьшаются при введении смещения длин волн излучения в соседних лазерных пучках на  $\Delta\lambda=10 - 20 \text{ \AA}$  и доля поглощенной лазерной энергии приближается к значению из расчета без учета процесса СВЕТ.

#### Список литературы

1. I. V. Igumenshchev, et al., Phys. Plasmas., 19, 056314 (2012).
2. Н.М. Барышева и др., Жур. Выч. Мат. и Мат. Физ., 22, 401 (1982).
3. O. V. Batishev, et al, Phys. Plasmas 9, 2302 (2002).
4. J. F. Myatt, et al., Phys. Plasmas., 24, 056308 (2017).
5. J. L. Laffite, et al., Phys. of Plasmas, 23, 012706 (2016).
6. С.А Бельков. и др., ЖЭТФ, 2015г., том 148, вып. 4.
7. D. H. Edgell, et al., Phys. Plasmas., 24, 062706 (2017)

**А.А. СТЕПАНЕНКО**

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОЙ ВМОРОЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ БЛОБОВ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКОВ**

В работе изучено влияние частичной вмороженности магнитного поля на динамику блобов (плазменных филаментов) в пристеночной области токамаков. Обсуждается качественная физическая картина воздействия этого электромагнитного эффекта на баланс токов и распределение электростатического потенциала внутри филамента при его движении в шировом магнитном поле установки. Представлены уравнения, описывающие динамику плазмы в рассматриваемом физическом случае. На их основе получены оценки влияния частичной вмороженности магнитного поля на величину и направление скорости движения блобов. Проведено компьютерное моделирование динамики филаментов в магнитном поле с токамакоподобной геометрией силовых линий. Результаты расчетов сравниваются с полученными в работе оценками параметров движения блобов.

**A.A. STEPANENKO**

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

## **INFLUENCE OF PARTIAL MAGNETIC FIELD FREEZING-IN CONDITION ON BLOB DYNAMICS IN TOKAMAK EDGE**

The influence of the partial magnetic field freezing-in condition on dynamics of blobs (plasma filaments) in the edge region of tokamaks is studied. The qualitative physical picture of the impact of this electromagnetic effect on the balance of currents and the distribution of the electrostatic potential in a filament during its motion in the sheared magnetic field of the machine is discussed. The equations, describing dynamics of plasma in the considered physical case, are demonstrated. On their basis, we derive the estimates for the influence of the partial magnetic field freezing-in condition on the magnitude and direction of blob motion. The numerical simulations of filament dynamics in a tokamak-like sheared magnetic field are performed. The modeling results are compared with the analytic estimates of the blob motion parameters derived in the study.

Перенос вещества и энергии блобами — локализованными плазменными образованиями, сильно вытянутыми вдоль направления силовых линий магнитного поля и имеющими плотность и температуру выше, чем окружающая их фоновая плазма, — считается в настоящее время одним из универсальных механизмов аномального (турбулентного)

переноса на периферии установок термоядерного синтеза. Как показывают экспериментальные исследования на ряде существующих токамаков [1], блобы могут переносить до половины от общего потока частиц и энергии на стенку установки, притом существенно неидеальным способом.

Исследованию движения блобов в пристеночной области токамаков посвящено значительное количество теоретических работ (см. например, обзоры [1,2]). При анализе динамики филаментов в плазме с малым значением параметра  $\beta = v/v_{te} < m_e/m_i$  ( $v$  – газодинамическое давление,  $v_{te}$  – магнитное давление,  $m_e$  и  $m_i$  – соответственно, массы электрона и иона), как правило, используется электростатическое приближение, при котором в уравнениях движения плазмы пренебрегают всеми электромагнитными эффектами. Однако, как показано в работе [3], применение подобного подхода для описания движения филаментов с малым  $\beta$  в широких магнитных полях может быть некорректным при условии, что глубина проникновения магнитного поля вглубь филамента (за характерное время его смещения поперек силовых линий) меньше его поперечного размера. Конкретные оценки толщины скин-слоя для параметров пристеночной плазмы токамаков DIII-D и ITER продемонстрировали [3], что описание движения блобов на периферии этих установок в рамках электростатических моделей может быть неточным и должно быть дополнено условием частичной вмороженности магнитного поля в плазму филаментов.

В представленной работе анализируется влияние неполной вмороженности силовых линий магнитного поля в плазму на характеристики движения блобов в пристеночной области токамака. Обсуждается качественная физическая картина воздействия этого эффекта на баланс токов и распределение электростатического потенциала внутри филамента при его движении в широком магнитном поле установки. Представлены уравнения движения плазмы, учитывающие условие частичной вмороженности магнитного поля, на их основе получены оценки для величины и направления скорости движения блобов. С использованием компьютерного кода BOUT++ [4] проведено моделирование динамики филаментов в магнитном поле с токамакоподобной геометрией силовых линий. Результаты расчетов сравнены с полученными аналитическими оценками параметров движения блобов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект № 18-32-00208 мол\_а.

#### *Список литературы*

1. D'Ippolito D. A., Myra J. R., and Zweben S. J. // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18. P. 060501.
2. Krasheninnikov S. I., D'Ippolito D. A., and Myra J. R. // J. Plasma Phys. 2008. Vol. 74. P. 679.
3. Stepanenko A. A., Lee W., and Krasheninnikov S. I. // Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 012301.
4. Dudson B.D., Umansky M.V., Xu X.Q., et al. // Comput. Phys. Comm. 2009. Vol. 180. P. 1467.

А.Б. ЛЯШЕНКО<sup>1</sup>, А.А. ПШЕНОВ<sup>1,2</sup>, А.А. СТЕПАНЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

## **ПОДГОТОВКА ПРОФИЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ И РАСЧЕТНЫХ СЕТОК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ БЛОБОВ НА ПЕРИФЕРИИ ТОКАМАКА T-15**

При помощи двумерного транспортного кода SOLPS получены распределения плотности, электронной и ионной температур на периферии токамака T-15 в различных режимах работы дивертора. Разработан пакет программ, позволяющих интерполировать параметры плазмы с расчетной сетки SOLPS на сетку турбулентного кода BOUT++ и вырезать из сетки BOUT++ участки, лежащие внутри первой стенки установки. Подготовленные профили параметров пристеночной плазмы и написанный пакет программ будут использованы при моделировании в коде BOUT++ динамики блобов на периферии токамака T-15.

A.B. LYASHENKO<sup>1</sup>, A.A. PSHENOV<sup>1,2</sup>, A.A. STEPANENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPHI*

*(Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*NRC "Kurchatov institute", Moscow, Russia*

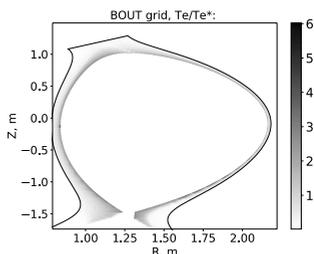
## **GENERATION OF BACKGROUND PLASMA PROFILES AND COMPUTATIONAL GRIDS FOR BLOB DYNAMICS SIMULATIONS IN THE EDGE OF TOKAMAK T-15**

Distributions of the plasma density, electron and ion temperatures are obtained for different regimes of divertor operation in the T-15 tokamak using 2D transport code SOLPS. The scripts allowing to map the profiles of the plasma parameters from the SOLPS computational grid to the grid of the 3D turbulent code BOUT++ and to cut the regions of interest within the machine first wall from the BOUT++ grid are developed. The prepared profiles and scripts will be used in the numerical study of blob dynamics in the edge of the T-15 tokamak within the BOUT++ framework.

Экспериментальные наблюдения на большом числе токамаков демонстрируют, что блобы (сильно вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля плазменные филаменты) могут быть ответственны за значительные потоки вещества и энергии на первую стенку этих установок [1]. Поэтому предсказание областей их преимущественного взаимодействия с материалами токамака, обращенными к плазме, является важной задачей.

В настоящее время для теоретического исследования движения отдельных блоков широко применяется компьютерное моделирование их динамики в таких турбулентных кодах, как HESEL, GBS, BOUT++ [1, 2]. Одним из часто используемых при этом физических приближений является предположение о пространственной однородности профилей параметров фоновой плазмы, в которой движутся блоки. В реальных установках профили параметров плазмы являются, как правило, неоднородными, притом как поперек, так и вдоль линий магнитного поля, что необходимо учитывать при анализе динамики блоков на периферии этих устройств.

В настоящей работе представлены результаты подготовки распределений параметров фоновой плазмы и расчетных сеток для моделирования движения блоков на периферии токамака T-15 в турбулентном коде BOUT++ [3]. При помощи двумерного транспортного кода SOLPS4.3 получены распределения плотности плазмы, электронной и ионной температур чистой дейтериевой плазмы в пристеночной области



токамака при различных значениях. Рис. 1. Распределение параметра средней плотности диверторной плазмы  $T_e/T_e^*$  на периферии токамака T-15. и мощности, приходящей в скрэп-слой установки из области удержания. Для передачи в BOUT++ полученных в SOLPS профилей параметров пристеночной плазмы, реализована программа, интерполирующая данные между расчетными сетками двух кодов. Для выделения областей скрэп-слоя, представляющих наибольший интерес при анализе движения блоков, в работе также написана программа, позволяющая вырезать области расчетной сетки BOUT++, лежащие внутри физической границы установки. В качестве примера на Рис. 1 представлено распределение отношения  $T_e/T_e^*$ , определяющее степень вмороженности магнитного поля в пристеночную плазму токамака [4], полученное на сетке BOUT++ при помощи набора разработанных программ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект № 18-32-00208 мол\_а.

#### *Список литературы*

1. D'Ippolito D. A., Myra J. R., and Zweben S. J. // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18. P. 060501.
2. Krashennnikov S. I., D'Ippolito D. A., and Myra J. R. // J. Plasma Phys. 2008. Vol. 74. P. 679.
3. Dudson B. D., Umansky M. V., Xu X. Q., et al. // Comp. Phys. Comm. 2009. Vol. 180. P. 1467.
4. Степаненко А. А. // Сборник тезисов конференции ЛаПлаз 2019.

В.Е. НИКОЛАЕВА, Г.М. ВОРОБЬЕВ, Ю.М. ГАСПАРЯН,  
Д.П. ИВАНОВ<sup>1,2</sup>, С.А. КРАТ,  
В.А. КУРНАЕВ, А.В. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## СТАТУС РАЗРАБОТКИ ТОКАМАКА МИФИСТ

В НИЯУ МИФИ ведется разработка и создание малого сферического токамака МИФИСТ для учебно-демонстрационных и исследовательских целей. Данная установка будет использоваться для ускоренной отработки технологий работы с литием, исследования удержания плазмы в сферическом токамаке, СВЧ-преионизации, поддержания тока с помощью ВЧ волн и отработки методов *in situ* анализа взаимодействия плазмы с поверхностью. На данный момент осуществлено проектирование токамака, разработаны концепции систем диагностик и дополнительного нагрева плазмы, начато изготовление вакуумной камеры и элементов электромагнитной системы.

V.E. NIKOLAEVA, G.M. VOROBEV, Yu.M. GASPARYAN,  
D.P. IVANOV<sup>1,2</sup>, S.A. KRAT,  
V.A. KURNAEV, A.V. MELNIKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation*

## ТОКАМАК МЕРФИСТ – STATUS OF DEVELOPMENT

A small spherical tokamak MEFHIST aimed at education, demonstration and research purposes is under development at NRNU MEFHI. This tokamak will be used to accelerate the development of lithium technology, studies of plasma confinement in a spherical tokamak, microwave preionization, steady-state RF current drive and in-situ analysis of plasma-surface interaction. At the moment, the design of the tokamak has been implemented, the concepts of diagnostic systems and additional plasma heating have been developed and the manufacture of the vacuum chamber and elements of the electromagnetic system has begun.

В НИЯУ МИФИ ведется разработка и создание малого сферического токамака для ускоренной отработки технологий работы с литием, исследования удержания плазмы в сферическом токамаке, СВЧ-предионизации, поддержания тока с помощью ВЧ волн и отработки методов *in situ* анализа взаимодействия плазмы с поверхностью. Помимо исследования вопросов и технологий актуальных в области УТС с магнитным удержанием, данный токамак будет также учебно-демонстрационной установкой для выполнения студенческих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с последующей профориентацией.

Сферическая конфигурация токамака рассматривается как одна из наиболее перспективных для осуществления реакции ядерного синтеза в источнике быстрых нейтронов [1]. По сравнению с традиционными вытянутыми токамаками, сферический токамак характеризуется меньшим аспектным отношением (отношением большого радиуса к малому) и возможностью получить высокое давление плазмы при относительно небольшой величине тороидального магнитного поля, что определяет экономическую эффективность работы реактора.

К настоящему времени технологии УТС на базе токамаков, в том числе и сферических, широко развиваются во всем мире. Однако ряд проблем, таких как проблема первой стенки и стационарное поддержание тока еще ждут своего технологического решения. Использование обращенных к плазме элементов на основе жидкого лития в термоядерных установках имеет много преимуществ, таких как отсутствие накопления радиационных повреждений в них, возможность контроля содержания изотопов водорода в установке за счёт рециркуляции лития, уменьшение примесей в плазме за счёт геттерных свойств лития. Влияние использования лития на рециклинг водорода в термоядерных установках потенциально позволяет реализовать новые перспективные режимы горения плазмы с нулевым рециклингом [2]. При этом экспериментальная база по влиянию лития на накопление изотопов водорода в обращенных к плазме элементах недостаточна для полного понимания процесса [3]. Влияние использования лития на рециклинг водорода в термоядерных установках – один из важнейших вопросов в его применении как материала обращенных к плазме элементов. При этом экспериментальная база по влиянию лития на накопление изотопов водорода в обращенных к плазме элементах недостаточна для полного понимания процесса.

В данный момент осуществлено проектирование учебно-демонстрационного и исследовательского токамака МИФИСТ, разработаны концепции систем диагностик и дополнительного нагрева плазмы, начато изготовление вакуумной камеры и элементов электромагнитной системы. Основные параметры установки: большой радиус  $R = 25$  см; малый радиус  $a = 13$  см; аспектное отношение  $A = R/a = 1.9$ ; вытянутость камеры  $k \sim 3$ ; тороидальное поле на оси  $B_0 \sim 0.5$  Т; ток плазмы  $I_{pl} \sim 200$  кА; длительность разряда  $t \sim 10-30$  мс. В конструкцию токамака заложена возможность модернизации с увеличением поля до 3Тл (что соответствует рекордному значению для сферических токамаков) и тока до 500кА.

*Список литературы*

1. Э.А. Азизов, Г.Г. Гладуш, В.Н. Докука, Р.Р. Хайрутдинов, В.П. Смирнов, А.А. Гостев, А.В. Лопаткин, Н.А. Обысов, Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 3—9.
2. L.E. Zakharov, Nuclear Fusion, in press
3. S.A. Krat, Y.M. Gasparyan, A.S. Popkov, A.A. Pisarev, Vacuum. 105 (2014) 111–114.

**Секция**

**ФИЗИКА ПЛАЗМЫ  
И ПЛАЗМЕННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции

– Курнаев В.А., д.ф.-м.н.,  
профессор кафедры № 21

Секретарь секции

– Кирко Д.Л., к.ф.-м.н.  
доцент кафедры № 21

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9321

E-mail: [VAKurnaev@mephi.ru](mailto:VAKurnaev@mephi.ru), [DLKirko@mephi.ru](mailto:DLKirko@mephi.ru)

**В.В. АНДРЕЕВ, Г.А. КРАВЧЕНКО, Ю.П. ПИЧУГИН**  
*ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»,  
Чебоксары, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОНОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРАХ ОЗОНА**

Представлены результаты исследования, посвященные разработке короностойких покрытий диэлектрических барьеров в плазмохимических генераторах озона.

**V.V. ANDREEV, G.A. KRAVCHENKO, YU.P. PICHUGIN**  
*Chuvash State University, Cheboksary, Russia*

## **INVESTIGATION OF CORONA-RESISTANT COATINGS IN PLASMA-CHEMICAL OZONE GENERATORS**

The results of study on development of corona-resistant coatings for dielectric barriers in plasma-chemical ozone generators are presented.

Эффективны для получения озонаплазмохимические генераторы барьерного типа. Недостатком таких генераторов озона является неудовлетворительный срок службы вследствие достаточно быстрого разрушения диэлектрика из-за воздействия микроразрядов, электрического поля, а также синтезируемого в разрядной ячейке озона, являющегося сильнейшим окислителем[1-6]. Поэтому актуальна разработка короностойкого покрытия диэлектрического барьера. Короностойкость покрытия может быть достигнута применением неорганических наполнителей: порошков  $Al_2O_3$ , талька и других.  $Al_2O_3$  является основной составной частью многих видов керамики (до 99.9 % у поликора), а на основе талька (70-85%) изготавливается высоковольтная стеатитовая керамика. Неорганические материалы обладают достаточными механическими и электрическими характеристиками и высокой температурой плавления около 2000°C. Таким образом, удовлетворяется требование термостойкости и короностойкости покрытия. Использование неорганического наполнителя также увеличивает теплопроводность поверхности диэлектрика, что обеспечивает более равномерное распределение температуры по поверхности, снижая локальные перегревы.

В данном исследовании использовались в качестве связующего лаки на кремнийорганической основе, которые весьма эффективно используются для защиты металлических изделий, работающих при высоких температурах. Кремнийорганические лаки и эмали характеризуются: стабильностью покрытия при высоких температурах

200–800°C, что соизмеримо с температурой размягчения стекломали; высокими электроизоляционными показателями; водо-маслобензостойкостью; высокими коррозионнозащитными свойствами.

Исследования проводились на различных диэлектрических барьерах, при различных конструкциях моделей секций генераторов озона, с различным типом охлаждения. Исследовалось влияние наполнителя короностойкого покрытия на продолжительность безотказной работы плазмохимических генераторов на основе диэлектрического барьерного разряда. В качестве наполнителей использовались порошки следующих материалов: оксид алюминия, двуокись титана, тальк, слюда, асбест. Было исследовано влияние материала связующего на срок службы диэлектрического барьера. В этих экспериментах в качестве связующих использовались кремнийорганические и пентафталевые лаки (эмаль «Цетра», лак КО-85, эмаль ПФ-115).

Лучший результат по короностойкости был достигнут с применением кремнийорганического связующего. Это обусловлено высокой нагревостойкостью данного материала. Установлено, что более существенно влияние на короностойкость материала связующего по сравнению влиянием материала наполнителя. Эффекты взаимодействия имеют малую значимость. Показано, что наилучшим наполнителем является тальк. В то же время наличие любого из исследованных покрытий существенно повышает ресурс работы диэлектрического барьера. Это позволило сделать вывод, что использование многослойных барьеров с короностойким покрытием значительно увеличивает срок службы разрядной ячейки.

#### *Список литературы*

1. Кравченко Г.А. Исследование высокоресурсного диэлектрического барьера для генераторов озона // Вестник Чувашского университета. 2008. №2. С. 100–103.
2. Кравченко Г.А., Макаров А.М., Пичугин Ю.П. Оценка ресурса системы высоковольтных электродов генераторов озона с многослойным диэлектрическим барьером // Вестник Чувашского университета. 2013. №3. С. 193–196.
3. Андреев В.В., Матюнин А.Н., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г. Исследование эффективности плазмохимических генераторов озона на барьерном разряде в воздухе при атмосферном давлении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2011. №4. С. 112–117.
4. Андреев В.В. Исследование воздействия диэлектрического барьерного разряда на кремнийсодержащую плёнку // Прикладная физика. 2014. №6. С. 24–28.
5. Андреев В.В., Васильева Л.А. Воздействие коронного разряда на нанесённые на поверхность текстолита плёнки термостойких кремнийорганических лаков с добавками порошков  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  // Прикладная физика, 2016, №4, с. 16–21.

**В.В. АНДРЕЕВ**

*ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»,  
Чебоксары, Россия*

## **ОСОБЕННОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ БАРЬЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЯЧЕЙКАХ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ДИЭЛЕКТРИКОМ**

Исследован диэлектрический барьерный разряд (ДБР) в ячейке с вращающимся диэлектриком. Проанализированы отличительные особенности генерации низкотемпературной плазмы сравнительно с разрядными ячейками ДБР, не содержащими подвижные части.

**V.V. ANDREEV**

*Chuvash State University, Cheboksary, Russia*

## **FEATURES OF BARRIER ELECTRIC DISCHARGE IMPLEMENTATION IN THE CELLS WITH ROTATING DIELECTRIC**

The dielectric barrier discharge (DBD) in a cell with a rotating dielectric is investigated. The distinctive features of low-temperature plasma generation are analyzed in comparison with the DBD cells, which don't contain moving parts.

Исследованию барьерного разряда в газовом промежутке плазмохимических реакторов в настоящее время уделяется существенное внимание, так как на его основе сравнительно легко реализовать химический синтез в промышленных масштабах [1], так и другие плазмохимические процессы [2]. Кроме того, в последнее время значительно возрос интерес к исследованию поверхностного барьерного разряда. Такой интерес вызван не только необходимостью совершенствования плазмохимических реакторов, но и дальнейшим развитием различных плазменных и плазмохимических технологий, в том числе, в связи с возможностью использования приповерхностной плазмы для управления высокоскоростными потоками воздуха путём воздействия на характеристики пограничного слоя с помощью электрических разрядов. Совершенствование плазменных и плазмохимических технологий невозможно без глубокого изучения пространственно-временной структуры барьерного разряда, отражающей механизм развития электрического пробоя в газоразрядном промежутке, не поняв который, невозможно целенаправленно воздействовать на процессы с

участием плазмы. Так, например, известно, что выход озона в плазмохимическом генераторе сложным образом зависит от различных внешних факторов: перенапряжения, частоты напряжения, влажности газа и скорости его потока, поверхностной проводимости барьер-диэлектрика, его удельной ёмкости. Также существенными параметрами, определяющими плотность вклада энергии в плазмохимический процесс, являются формы и размеры канала микроразряда. Определение геометрии канала микроразряда представляет сложную и не до конца решенную задачу вследствие статистического характера появления отдельных микроразрядов. Действительно, каждый микроразряд существует десятки наносекунд и в каждой последующей серии микроразрядов их местоположение меняется. Также параметры микроразряда (геометрия и интенсивность свечения канала, расстояние между микроразрядами) изменяются в соответствии с полярностью подаваемого на электроды напряжения. В данной работе выполнены экспериментальные исследования и количественный анализ развития микроразрядов и генерации низкотемпературной плазмы в специфическом случае ДБР [3-6] в ячейке с вращающимся диэлектриком.

Полученные результаты представляют интерес точки зрения дальнейшего совершенствования плазменных, плазмохимических и плазменно- управляемых процессов.

#### *Список литературы*

1. Андреев В.В. Диэлектрический барьерный разряд: области его применения и новые способы реализации // Сборник трудов IV Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» Лаплаз-2018: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 192-193.
2. Андреев В.В. Плазмохимические генераторы озона для нужд АПК // Ресурсосберегающие технологии при хранении и переработке сельскохозяйственной продукции: Материалы XIV Международного научно-практического семинара. – Орел: ООО Полиграфическая фирма «Картуш», 2018. – 308 с. С. 40-43.
3. Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г. Исследование электрических разрядов в воздухе между подвижными электродами // Физика плазмы. 2011. Т.37, №12. С. 1130–1135.
4. Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе барьерного разряда // Приборы и техника эксперимента. 2013. Т.56, №3. С. 58–60.
5. Андреев В.В., Пичугин Ю.П. Исследование низкотемпературной плазмы между вращающимися электродами // Физика плазмы, 2014. Т. 40, №6. С.563–570.  
Andreev V.V., Brandenburg R., Sarani A., Kettlitz M. Investigation of single filaments in a dielectric barrier discharge with rotating electrode // Hakone XV: International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry with joint COST TD1208 workshop Non-Equilibrium Plasmas with Liquids for Water and Surface Treatment. Book of Contributed Papers. Edited by Mirko Černák, Tomáš Hoder. Published by Masaryk University, Czech Republic, 2016. – 474 p. P. 110– 113.

О.А. БАШУТИН, П.П. СИДОРОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА С ПРЕДИОНИЗАЦИЕЙ**

*Представлен вариант реализации разряда типа «плазменный фокус» с использованием преионизации газа у поверхности изолятора для улучшения условий формирования токово-плазменной оболочки. Формирование плазменного фокуса определялось по наличию особенности на кривой разрядного тока, сопровождаемой импульсом рентгеновского излучения.*

O.A. BASHUTIN, P.P. SIDOROV

*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*

## **REALIZATION OF PLASMA FOCUS WITH PREIONIZATION**

*The discharge of the "plasma focus" type using preionization at the insulator surface to improve the conditions of the current sheath formation is presented. The formation of the plasma focus was determined by the presence of a dip in the discharge current curve accompanied by an x-ray pulse.*

Исследования проводились на установке ПФМ-72м с полусферическими электродами. Диаметр анода 30 мм, диаметр катода 50 мм. В качестве накопителя использовалась конденсаторная батарея суммарной емкостью 6 мкФ. При зарядном напряжении  $U_0=28$  кВ амплитуда тока разряда достигала 260 кА. Период разряда составлял 3.8мкс. В качестве рабочего газа использовался аргон при давлении 1 Торр. Ток разряда контролировался поясом Роговского, а рентгеновское излучение в диапазоне 3 - 30 кэВ рентгеновским пин-диодом. Регистрация сигналов производилась на осциллограф Tektronix TDS2024.

Электрическая схема установки показана на рис.1. Емкостной накопитель состоит из двух конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  емкостью по 3 мкФ, каждый из которых коммутируется своим разрядником. После подачи импульса запуска  $U_{упр}$  на вакуумный разрядник R5 происходит разряд емкости  $C_7$  на первичные обмотки импульсных трансформаторов ИТ1 и ИТ2. Импульсное напряжение со вторичных обмоток поступает на обострители, реализованные с помощью конденсаторов  $C_3, C_5$  и разрядников  $R_3, R_4$ . Зазоры  $d_1$  и  $d_2$  разрядников обострителей настроены таким образом, что разрядник  $R_3$  пробивается на  $\sim 100$  нс раньше, чем

разрядник  $R_4$ . Импульс напряжения с разрядника  $R_3$  через разделительную емкость  $C_4$  прикладывается непосредственно к электродам разрядного устройства. Происходит пробой вдоль поверхности изолятора и предионизация газа у его поверхности. Длительность токового импульса поджига  $\sim 60$ нс, фронт нарастания 20нс. Амплитуда тока  $\sim 400$ А.

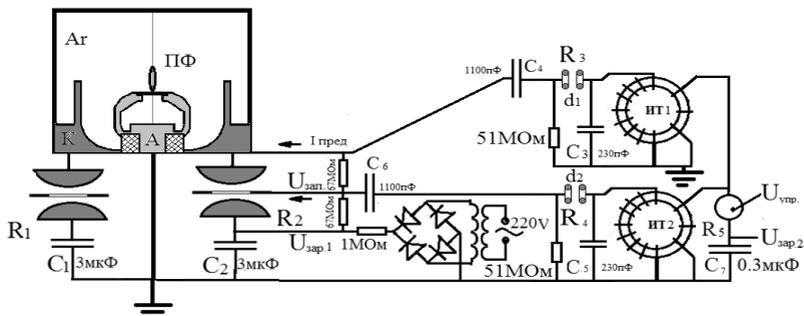


Рис.1. Электрическая схема установки ПФМ72-м.

Импульс напряжения с разрядника обстрелителя  $R_4$  поступает на управляющие электроды разрядников  $R_1$  и  $R_2$  конденсаторной батареи с задержкой  $\sim 100$  нс. За это время электроны в межэлектродном пространстве не успевают полностью рекомбинировать и обеспечивают ускорение процесса формирования токово-плазменной оболочки.

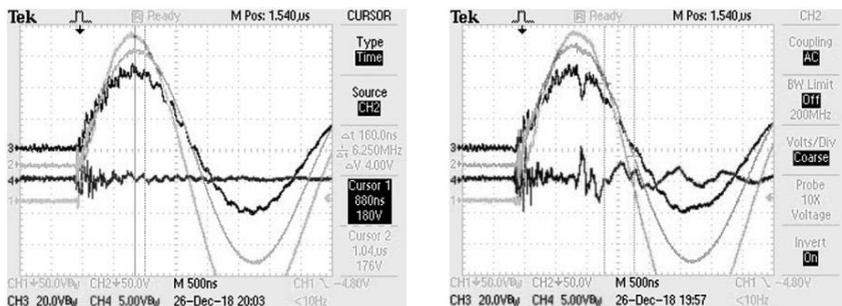


Рис.2. Ток разряда (канал 3) и сигнал рентгеновского пин-диода (канал4) для случаев без предионизации (слева) и с предионизацией (справа) при  $U_0=25$  кВ

Как показано на рис.2, в случае с предионизацией появляется характерный провал на кривой разрядного тока, сопровождаемый появлением сигнала рентгеновского излучения, что свидетельствует об эффективном пинчевании и формировании плазменного фокуса.

О.А. БАШУТИН, Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ**

Изучаются свойства плазмы вакуумной искры в зависимости от материала электродов. Определен спектральный состав излучения плазмы в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра. Регистрируется наличие электрических колебаний в области 1-150 МГц. Проведено исследование микроструктуры поверхности стальных и медных электродов. Наблюдается наличие периодических волнообразных структур с характерными размерами около 230 мкм, 15 мкм и 2 мкм. Происходит грануляция поверхности металла с размерами ячеек в диапазоне 0,2-1 мкм.

D.L. KIRKO, O.A. BASHUTIN, A.S. SAJOLOV

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

## **INVESTIGATION OF PLASMA OF VACUUM SPARK NEAR ELECTRODE SURFACE**

The dependence of plasma properties of the vacuum spark from electrode matter is researched. The spectral data of the plasma radiation in ultraviolet and visible regions had been obtained. Electric oscillations in range 1-150 MHz are registered. Microstructures of the surfaces of steel and copper electrodes were investigated. The periodic wave like formations with typical dimensions near 230  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$  and 2  $\mu\text{m}$  are observed. The origin of metal surface granulation with cell dimensions in the region 0,2-1  $\mu\text{m}$  is happened.

Низкоиндуктивная вакуумная искра, наряду с плазменным фокусом, является установкой для исследования процессов пинчевания сильных токов и образования плотной плазмы [1,2]. На стадии распада пинча происходит появление интенсивных плазменных потоков, воздействующих на поверхность электродов. Данный разряд является мощным источником электромагнитного излучения ультрафиолетового и видимого диапазонов. В плазме вакуумной искры могут возникать условия для появления интенсивных высокочастотных колебаний и волн [3,4].

Для работы экспериментальной установки используется емкостной накопитель энергии величиной 20 мкФ при зарядном напряжении 5-20 кВ. В качестве электродной системы вакуумной искры применяется анод из стали или меди, в виде стержня (диаметр 2-4 мм), и стальной катод

цилиндрической формы с отверстием 1,5-2 мм в центре. Расстояние между электродами составляет 4-5 мм. Рабочее давление в камере поддерживается в диапазоне  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  Тор. Инициирование разряда производится тригерным разрядником. Ток разряда находится в диапазоне 100-150 кА при периоде разряда 8,5 мкс. При включении разряда происходит испарение анода и центральной части катода. На оси разряда наблюдается образование пинча и его последующее сжатие в течение первого полупериода тока. При пинчевании разряда регистрируется возникновение плотных и интенсивно излучающих в рентгеновском диапазоне спектра объектов – микропинчей (плазменных точек).

Для регистрации электрических колебаний использовались осциллограф Tektronix TDS 2024B и низкоиндуктивные магнитные зонды. Основные частоты данных колебаний имеют следующие значения:  $4,1 \pm 0,1$  МГц,  $9,2 \pm 0,2$  МГц,  $35 \pm 1$  МГц,  $95 \pm 2$  МГц. С помощью спектральных измерений по водородным линиям  $H_{\alpha}$  656 нм и  $H_{\gamma}$  434 нм методом относительных интенсивностей была рассчитана температура приэлектродной плазмы, которая составила величину  $T=8200 \pm 300$  К.

Изучение микроструктуры поверхности электродов проводилось с помощью электронных микроскопов Hitachi TM1000 и VEGA 3 SEM. Поверхность анода подвержена мощному воздействию потоку электронов с плотностью энергии 30-50 Дж/мм<sup>2</sup>. На данной поверхности после воздействия плазмы наблюдается возникновение волнообразного рельефа. Данные структуры в количестве до 5-7, похожие на волны с длиной волны около 220-250 мкм, направлены к закругленной оконечности анода. Практически на каждом гребне этих волн расположены меньшие волны с длинами волн около 10-20 мкм. На данных волнах наблюдаются самые малые волны с длинами волн около 2-3 мкм. Вместе с тем на поверхности также присутствуют образования похожие на хлопья или пух размерами 10-40 мкм. На отдельных участках поверхности анода формируются области, содержащие грануляцию металла с величиной ячеек 0,2-1 мкм. Вблизи центрального отверстия катода наблюдается возникновение концентрических колец. Расстояние между двумя соседними кольцами находится в диапазоне около 150-250 мкм.

#### *Список литературы*

1. Русских А.Г., Бакшт Р.Б., и др. // Физика плазмы, 2012, Т. 38, Вып. 8, С. 651-664.
2. Башутин О.А., Савелов А.С. // Письма в ЖТФ, 2015, Т. 41, Вып. 2, С. 1-5.
3. Кирко Д.Л., Савелов А.С. // Изв. высш. учеб. зав. Физика. 2014, Т. 57, Вып. 11, С. 3-6.
4. Kirko D.L., Savjolov A.S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1115, P. 022010.

Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, Н.В. ВОЛКОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАЗМЫ СВЕРХВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ В ОСНОВАНИИ ПИНЧЕВЫХ РАЗРЯДОВ И ПОСЛЕРАЗРЯДНАЯ ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ**

Рассмотрено образование плазмы сверхвысокой плотности в основании пинчевых разрядов. Описаны процессы, которые протекают в данный момент времени. Представлены параметры этой плазмы. Описано поведение электронов в этом образовании.

B.Yu. BOGDANOVICH, N.V. VOLKOV, A.V. NESTEROVICH  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **FORMATION OF THE PLASMA OF ULTRA-HIGH DENSITY- STI IN THE BASIS OF PUSH DISCHARGES AND AFTER- DISCHARGE ELECTRON EMISSION**

The formation of ultrahigh density plasma at the base of pinch discharges is considered. Describes the processes that occur at a given time. The parameters of this plasma are presented. The behavior of electrons in this formation is described.

В процессе формирования пинчевых разрядов в потоке жидкости (ПРПЖ) [1] в основании пинча над поверхностью в ближней зоне образуется достаточно высокой плотности с параметрами (плотностью, температурой), характерными для других разновидностей таких разрядов. Однако материаловедческие исследования поверхности в основании пинча указывают на наличие сверхвысоких давлений и высокой плотности в металле в области с характерными размерами (30 ÷ 100) мкм в диаметре и до 300 мкм по глубине [2]. Другие результаты, предположительно, связаны с кратковременным образованием зон пара металлических ионов с достаточно высокой степенью ионизации, причем плотность электронов превышает первоначальную за счет поступающих из пинча электронов (импульсный ток – несколько сотен Ампер). Дополнительное увеличение плотности связано с замедлением электронов, т.е. "продольной компрессией" электронного потока в вертикальном направлении.

Теоретические исследования [3] указывают на возможность обретения электронами достаточно высокой плотности свойств "куперовских пар",

обладающих свойствами сверхтекучести (сверхпроводимости) в зоне их локализации.

Данное толкование, подтверждается исследованиями свойств долгоживущих плазмидов в области квантовой физики.

Предположительно, оно может объяснить последующие эффекты, связанные с наличием точечных зон свечения поверхности [1] в течение длительного времени (до нескольких суток). Особенно наглядно эти свойства проявляются в случае послеразрядной эмиссии, сопровождаемой прохождением электронов через диэлектрическую пластинку, расположенную над обработанной металлической поверхностью. Эти электроны группируются в отдельные вращающиеся вокруг своей оси электронные кольца диаметром ( $2 \div 3$ ) мм. Сами кольца образуют подобие колеса, вращающегося, в свою очередь, вокруг собственной оси. Данное "колесо" перемещается над поверхностью, удаляясь от зоны эмиссии, и постепенно формирует "смерч", подобный пинчу в разряде, по крайней мере, по форме и размерам. Угловая скорость вращения – несколько оборотов в минуту. Длительность всего процесса наблюдения – несколько минут.

Предварительный анализ результатов указывает на квантовые свойства объектов плазменного типа. В частности, об этом свидетельствуют одинаковые размеры всех колец, их ориентация в пространстве, возможность длительного существования в воздушной среде, вращение.

В теории эволюции магнитных зарядов и поведения электронов в зоне их действия можно найти объяснения упоминаемым процессам, учитывая их квантованность. Однако, требуются дополнительные исследования и статически выверенные экспериментальные результаты.

Работа выполнена в рамках Соглашения № 17-72-20228 между Российским научным фондом и НИЯУ «МИФИ» о предоставлении гранта на проведение фундаментальных и поисковых научных исследований.

#### *Список литературы*

1. П.В. Алферов, Б.Ю. Богданович, Н.В. Волков, Н.А. Лень, А.В. Нестерович, А.Н. Старостин. «Структурное состояние материалов после воздействия периодического разряда в потоке жидкости». Инженерная физика, № 4, 2000, С. 58 – 61.
2. А.В. Нестерович, Г.П. Фетисов. Деформационное упрочнение металла при воздействии периодическим разрядом в потоке жидкости (ПРПЖ). Инженерная физика. № 5, 2007, С. 7-12.
3. Мейерович Б.Э. Канал сильного тока. – М.: ООО "ФИМА", 1999. – 375с.

А.М. БОРИСОВ<sup>1,2</sup>, Б.Л. КРИТ<sup>1,2</sup>, В.Б. ЛЮДИН<sup>2,3</sup>,  
И.В. СУМИНОВ<sup>2</sup>, А.В. ЭПЕЛЬФЕЛЬД<sup>1,2</sup>,  
К.А. АНИКИН<sup>1</sup>, И.О. КОНДРАЦКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет), Россия

<sup>2</sup>МГТУ «СТАНКИН», Россия

<sup>3</sup>Российский государственный аграрный заочный университет, Россия

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА НА ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ

Проведено плазменно-электролитическое оксидирование поверхности алюминиевого сплава Д16 в фосфатном (1.5 г/л NaOH + 9 г/л NaSiO<sub>3</sub> + 3 г/л Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) и молибдатном (5 г/л NaOH + 30 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + 5 г/л (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>) электролитах. При оксидировании в молибдатном электролите получают более толстые покрытия с меньшей микротвердостью и высокой сквозной пористостью. Покрытия, полученные в фосфатном электролите – менее толстые, они имеют большую микротвердость как рабочего, так и технологического слоя.

A.M. BORISOV<sup>1,2</sup>, B.L. KRIT<sup>1,2</sup>, V.B. LYUDIN<sup>2,3</sup>,  
I.V. SUMINOV<sup>2</sup>, A.V. APELFELD<sup>1,2</sup>,  
K.A. ANIKIN<sup>1</sup>, I.O. KONDRATSKY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

<sup>2</sup>Moscow State University of Technology «STANKIN», Russia

<sup>3</sup>Russian State Agrarian Correspondence University, Russia

## EFFECT OF ELECTROLYTE COMPOSITION ON THE FOR- MATION AND PROPERTIES OF OXIDE PLASMA ELECTRO- LYTIC COATINGS ON ALUMINUM ALLOY

Plasma-electrolytic oxidation of the surface of the aluminum alloy D16 was carried out in phosphate (1.5 g / l NaOH + 9 g / l NaSiO<sub>3</sub> + 3 g / l Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) and molybdate (5 g / l NaOH + 30 g / l Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + 5 g / l (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>) electrolytes. Oxidation in a molybdate electrolyte produces thicker coatings with lower microhardness and high through porosity. The coatings obtained in the phosphate electrolyte are less thick, they have a greater microhardness of both the working and technological layers.

Плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО) широко используют для получения защитных и функциональных керамикоподобных покрытий на поверхности алюминиевых сплавов [1]. Компонентный состав, концентрация и температура электролита влияют на структуру, элементный и фазовый состав ПЭО-покрытий и, как следствие, на их свойства, толщину и скорость формирования оксидного слоя. В настоящей работе для установления закономерностей процесса оксидирования провели сравнительное исследование ПЭО образцов из алюминиевого сплава Д16 в двух водных электролитах с различным составом компонентов. Первый, фосфатный электролит содержал 1.5 г/л NaOH + 9 г/л NaSiO<sub>3</sub> + 3 г/л Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, второй, молибдатный электролит содержал 5 г/л NaOH + 30 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + 5 г/л (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>. ПЭО делали в анодно-катодном режиме при плотности тока 10 А/дм<sup>2</sup> с длительностью от 5 до 320 мин. Исследование образцов включало в себя анализ элементного состава и распределения элементов по глубине с применением метода спектрометрии ядерного обратного рассеяния (ЯОР) протонов с энергией 7.5 МэВ [2], измерение общей толщины, сквозной пористости, микротвердости технологического слоя ПЭО-покрытий и, после его абразивного удаления, микротвердости рабочего твердого слоя.

Найдено, что ПЭО в молибдатном электролите позволяет получать более толстые ПЭО-покрытия, обладающие меньшей микротвердостью и высокой сквозной пористостью. Покрытия, полученные в фосфатном электролите – менее толстые, они имеют большую микротвердость как рабочего, так и технологического слоя. Зависимость сквозной пористости от толщины покрытия для фосфатного электролита имеет экстремальный характер с минимумом для толщины ~50 мкм. Различия данных по толщине ПЭО-покрытий, полученных с помощью спектрометрии ЯОР и с использованием токовихревого толщиномера, свидетельствуют о наличии развитаой системы пор в МДО-покрытиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, уникальный идентификатор Соглашения RFMEFI57718X0288.

#### *Список литературы*

1. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий : в 3 т. / Т. II : Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов / П. Н. Белкин, А. М. Борисов, В. А. Васин, Б. Л. Криг, В. Б. Людин, О. В. Сомов, В. А. Сорокин, И. В. Суминов, В. П. Францкевич, А. В. Эпельфельд. М. ; СПб. : Реноме, 2017. 520 с.
2. Беспалова О.В., Борисов А.М., Востриков В.Г., Романовский Е.А., Серков М.В. // Ядерная физика. 2009. Т.72. С. 1721-1729.

Ю.В. БОРИСЮК, Н.М. МИХАЙЛИЦЫНА, В.Е. ДРОБИНИН,  
М.М. БЕРДНИКОВА, А.А. ПИСАРЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

### **АЗОТИРОВАНИЕ СТАЛЕЙ 30ХГСА, 30ХН2МФА И 03Х11Н10М2Т-ВД**

Проведено исследование по азотированию сталей марок 30ХГСА, 30ХН2МФА и 03Х11Н10М2Т в аномальном тлеющем разряде при различном содержании азота в среде. Цель: подобрать режимы азотирования при которых не происходит изменение рельефа, не образуется компаунд слой, но при этом образуется диффузионная зона.

Yu.V. BORISYUK, N.M. MIKHAILITSYNA, V.E. DROBININ,  
M.M. BERDNIKOVA, and A.A. PISAREV

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

### **NITRIDING STEEL 30CrMnSi, 30Ni2CrMoV, 03Cr11Ni10Mo2Ti**

Analyses of steels 30CrMnSi, 30Ni2CrMoV, 03Cr11Ni10Mo2Ti nitride in abnormal glow discharge at two different nitrogen pressure in the working gas mixture has been performed. The purpose of the work is to choose the nitriding regimes leading to no changes of the surface relief, no compound layer, but with the formation of a deep diffusion zone.

Образцы из стали 30ХГСА, 30ХН2МФА и 03Х11Н10М2Т-ВД были подвергнуты азотированию в плазме аномального тлеющего разряда (установка АТР (МИФИ) [1]). Было проведено два эксперимента, отличающихся содержанием азота в среде (процесс 1 – 9% азота, процесс 2 – 50% азота). Температура азотирования 400 – 450 °С, длительность 8 часов. Образцы обрабатывались одновременно. Было установлено, что для сталей 30ХН2МФА, 30ХГСА в результате процесса 1 компаунд слой не образуется, а в результате процесса 2 образуется тонкий компаунд слой, слабо разрешимый в РЭМ. Диффузионная зона в этих процессах составляет 100 и 160 мкм для стали 30ХН2МФА, 50 и 100 мкм для стали 30ХГСА. Рельеф поверхности не меняется в обоих случаях. При азотировании образцов из стали 03Х11Н10М2Т, независимо от содержания азота в смеси, образуется однородная зона с постоянной твердостью (15 и 20 мкм для процессов 1 и 2 соответственно). При этом наблюдается незначительное изменение рельефа поверхности. Также

наблюдается образование микротрещин в приповерхностном модифицированном слое в результате обоих процессов.

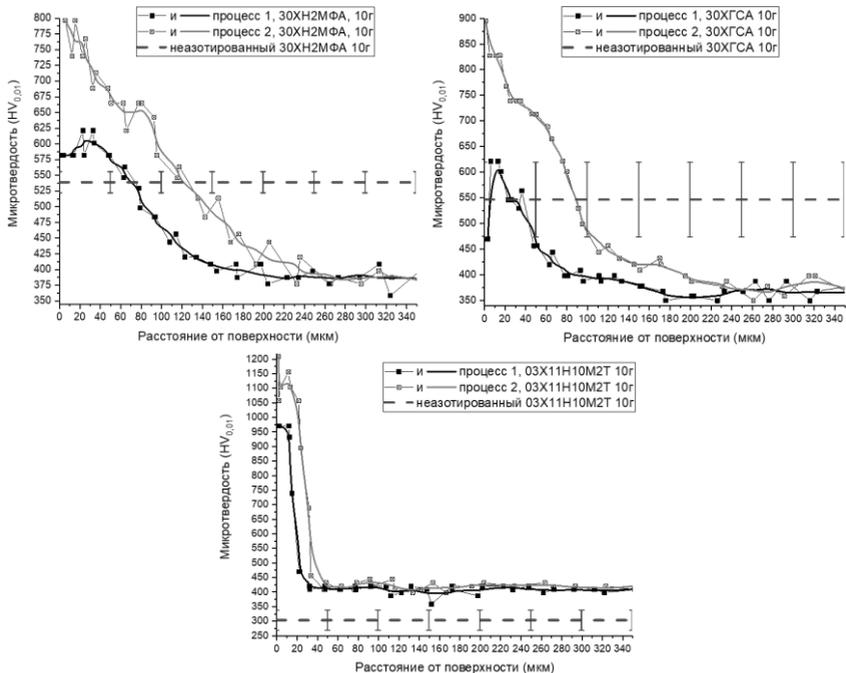


Рис. 1. Кривые твердости для сталей 30XN2MFA, 30XGSA и 03X11N10M2T для двух процессов.

*Список литературы*

1. Borisyuk Yu.V., Oreshnikova N.M., Berdnikova M.A. and others// Physics Procedia. 2015. Vol. 71, P. 105-109.

**В.В. БОРОГ, Н.В. ОСЕТРОВА**

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **МОНИТОРИНГ БЫСТРОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ВАРИАЦИЯМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

В работе использован метод фликкер-шумовой спектроскопии для идентификации быстрого солнечного ветра из корональных дыр. Методика основана на изучении кратковременных вариаций потока космических лучей, которые возникают при пересечении возмущенных областей внутренней гелиосферы. Результаты получены с помощью наземной установки мюонный годоскоп УРАГАН (Москва). Методика может быть использована для непрерывного мониторинга космической погоды.

**V.V. BOROG, N.V. OSETROVA**

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

## **MONITORING OF THE FAST SOLAR WIND FOR COSMIC RAY VARIATIONS**

The method of flicker-noise spectroscopy is used for remote identification of fast solar wind from coronal holes. The method is based on the study of short-term variations in the cosmic-ray flux that arise when it crosses the disturbed regions in the inner heliosphere. The results are obtained using a ground-based muon hodoscope URAGAN (Moscow). The technique can be used for continuous monitoring of space weather.

Солнечная активность в виде корональных выбросов массы плазмы, магнитных облаков и быстрого солнечного ветра (СВ) являются основными факторами возмущения околоземного космического пространства и магнитосферы Земли. На границах фазы минимумов 11-летней солнечной цикличности главным фактором возмущения является быстрый СВ из корональных дыр (КД). Его характерная скорость составляет более 500 км/с. Вращение Солнца обуславливает спиралевидную форму потока истекающей плазмы в гелиосфере. Это приводит к столкновению быстрой и стационарной медленной плазмы, что создает турбулентность, локальные зоны сжатия и разряжения СВ. Активные области в фотосфере Солнца в виде КД могут существовать в течение нескольких оборотов, и тем самым образуют рекуррентные неоднородности межпланетного магнитного поля в направлении Земли, повторяющиеся с периодом около месяца. При попадании Земли в такие

области, в магнитосфере часто возникают возмущения магнитного поля, что приводит к нежелательным геоэффективным явлениям.

Непосредственная идентификация области КД на Солнце осуществляется с помощью магнитометров различного типа, начиная с восточной стороны диска. Это позволяет проследить динамику развития КД и дать прогноз возможности попадания Земли в поток быстрого СВ в течение 2-недельного периода времени, связанного с вращением Солнца.

Для мониторинга попадания Земли в поток быстрого СВ можно использовать косвенный метод, связанный с вариациями потока протонов галактических космических лучей (КЛ) высокой энергии, пересекающих турбулентную область плазмы в области внутренней гелиосферы. Эти частицы движутся почти со скоростью света и попадают в детекторы на Земле практически мгновенно (через несколько минут). Эффект вариаций мал и составляет величину порядка одного процента. Требуется специальная методика выделения кратковременных спорадических вариаций потока КЛ в статистически зашумленных временных рядах.

В данной работе впервые использована методика фликкер-шумовой спектроскопии [1, 2], которая оказывается более эффективной чем фурье- и вейвлет-анализ для выделения полезных сигналов в зашумленных нестационарных временных рядах. Приведены примеры мониторинга быстрого СВ по результатам анализа вариаций мюонов КЛ, зарегистрированных установкой УРАГАН НИЯУ МИФИ.

Работа выполнена на уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (Проект МИФИ № 02.a03.21.0005) и в соответствии с грантом РФФИ 16-05-00997.

#### *Список литературы*

1. Тимашев С.Ф. Метод фликкер-шумовой спектроскопии. Информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит. 2007. 245 с.
2. Borog V.V., Dmitrieva A.N., Kovylyayeva A.A. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012050.

К. Ю. ВАГИН<sup>1</sup>, Т. В. МАМОНТОВА<sup>1,2</sup>, С. А. УРЮПИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## **ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ С НЕСКОЛЬКИМИ ПИКАМИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ**

Рассмотрены дисперсионные свойства продольных электронных волн в плазме, распределение фотоэлектронов в которой имеет несколько обособленных пиков. Установлено, что число таких волн совпадает с числом пиков функции распределения фотоэлектронов. Показано, что в области больших волновых чисел закон дисперсии каждой из волн близок к линейному и определяется электронами из соответствующего пика.

K. YU. VAGIN<sup>1</sup>, T. V. MAMONTOVA<sup>1,2</sup>, S. A. URYUPIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **WAVES IN PLASMA WITH SEVERAL PEACKS IN THE PHOTOELECTRON DISTRIBUTION**

Dispersion properties of longitudinal electron waves in plasma, the photo electron distribution in which has several distinct peaks, are considered. It is established that the number of such waves coincides with the number of peaks of the photoelectron distribution function. It is shown that in the region of large wave numbers the dispersion law of each of the waves is close to linear one and is determined by electrons from the corresponding peak.

Плазма с энергетическим распределением фотоэлектронов, состоящим из набора отдельных пиков, образуется, например, в поле интенсивного лазерного излучения в режиме надпороговой ионизации атомов газа. Каждый из этих пиков отвечает поглощению определенного числа фотонов. Распределение фотоэлектронов с несколькими пиками сильно отличается от максвелловского, что приводит к существенному изменению свойств фотоионизованной плазмы.

В настоящей работе изучены высокочастотные продольные плазменные волны в плазме с несколькими пиками в распределении фотоэлектронов. Проведенный нами анализ показал, что в такой плазме каждому пику в распределении фотоэлектронов отвечает своя продольная волна, а закон дисперсии этих волн в области больших волновых чисел имеет вид

$$\omega_i = kv_i, \quad (1)$$

где  $v_i$  - средняя скорость фотоэлектронов, относящихся к пику с номером  $i$ .

На рис.1 представлены результаты численного решения дисперсионного уравнения для продольных волн в случае слабоионизованной плазмы, полученной при надпороговой ионизации атомов ксенона импульсом лазерного излучения с плотностью потока энергии  $I=2.6 \cdot 10^{12} \text{W/cm}^2$  и длительностью  $\sim 100$  фс, распределение фотоэлектронов в которой имеет четыре ярко выраженных неперекрывающихся энергетических пика.

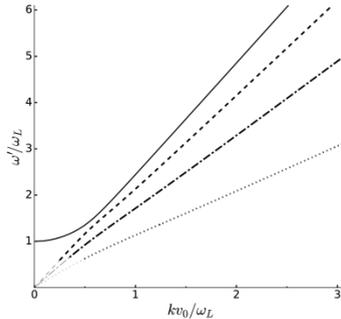


Рис. 1. Зависимость безразмерных частот плазменных волн от безразмерного волнового числа в фотоионизованной плазме с 4 энергетическими пиками в распределении фотоэлектронов

Согласно рис.1 количество ветвей плазменных волн равно числу пиков в энергетическом распределении фотоэлектронов. В пределе больших волновых чисел все волны имеют закон дисперсии близкий к линейному (1), а их частоты в несколько раз превышают плазменную частоту электронов. При учете конечной ширины каждого пика, отвечающей разбросу скоростей  $\Delta v_i$ , получены декременты бесстолкновительного затухания таких волн, которые демонстрируют, что в широком диапазоне волновых чисел  $k < \omega_L / \Delta v_i$  продольные волны (1) остаются слабозатухающими. В длинноволновой области бесстолкновительное затухание волн пренебрежимо мало, а частота самой высокочастотной моды при малых  $k$  близка к полной электронной ленгмюровской частоте  $\omega_L$  и эта волна подобна обычной электронной ленгмюровской волне в плазме с максвелловским распределением электронов по скоростям.

А.А. ГАРМАТИНА, А.А. АНДРЕЕВ, А.А. КОНОВКО,  
Ф.В. ПОТЕМКИН и В. М. ГОРДИЕНКО

*Физический факультет и МЛЦ, Московский государственный университет им.  
М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

## **ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ЗАЖИГАЕМОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ЛЕНТЫ**

Продемонстрирована генерация рентгеновского излучения из лазерно-индуцированной плазмы зажигаемой фемтосекундным лазерным излучением на поверхности коммерчески доступной наноструктурированной магнитной ленты при интенсивности  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> и энергии 170 мкДж. Эффективность конверсии составила  $5 \cdot 10^{-9}$ .

A.A. GARMATINA, A.V. ANDREEV, A.A. KONOVKO,  
F.V. POTEKIN, and V.M. GORDIENKO

*Faculty of Physics and ILC,  
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

## **REPETITION RATE X-RAY GENERATION FROM FEMTO- SECOND LASER PLASMA FORMED ON THE SURFACE OF NANOSTRUCTURED MAGNETIC TAPE.**

It was demonstrated the generation of X-ray radiation from a laser-induced plasma switched by femtosecond laser on the surface of a commercially available nanostructured magnetic tape at laser intensity  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> and energy of 170  $\mu$ J. The conversion efficiency was found to be  $5 \cdot 10^{-9}$ .

Использование наноструктурированных мишеней облучаемых высокоинтенсивным фемтосекундным лазерным излучением может приводить к увеличению энерговклада, более эффективной генерации горячих электронов и, следовательно, повышению выхода рентгеновского излучения (РИ) [1]. Для получения стабильного источника рентгеновского излучения в экспериментах использована коммерчески доступная магнитная лента в качестве облучаемой мишени и источника РИ. Такая магнитная лента состоит из тонкого слоя магнитного пигмента окислов железа (в виде наноцилиндров), взвешенного внутри полимерного связующего слоя. При воздействии фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью более 0.1 ПВт/см<sup>2</sup> наноплазма мишени может быть источником как харак-

теристического, так и тормозного рентгеновского излучения. Нами получено, что выход рентгеновского излучения в характеристическую К-линию железа (6.4кэВ) из наноплазмы магнитной пленки зажигаемой фемтосекундным лазерным излучением (1.24 мкм, 200 фс, 10 Гц.) с относительно низкой интенсивностью  $0.3 \text{ ПВт/см}^2$  (энергия 170 мкДж) составил  $5 \cdot 10^{-9}$  и оказался сопоставимым с результатами, полученными нами при воздействии на железную мишень лазерными импульсами той же энергии.

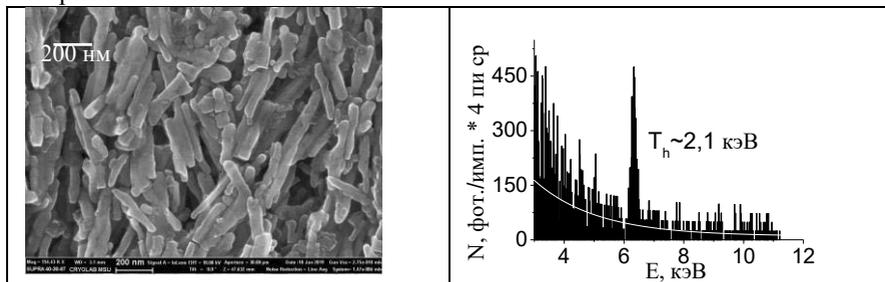


Рис.1. Изображение приповерхностного слоя магнитной ленты (слева). Длина столбиков  $400 \pm 200 \text{ нм}$ , толщина  $30 \pm 10 \text{ нм}$ . Толщина магнитного слоя  $3 \text{ мкм}$ , толщина подложки  $16 \text{ мкм}$ . Спектр железа в диапазоне  $3\text{-}10 \text{ кэВ}$ , полученный из наноплазмы магнитной пленки (справа).

Теоретически проанализирована эффективность возбуждения фемтосекундным лазерным излучением электронной подсистемы металлических наноцилиндров. В докладе обсуждаются результаты теоретического анализа в предположении, что наноцилиндры в процессе исходного намагничивания ориентированы в среднем вдоль продольной оси пленки и выход рентгеновского излучения является поляризационно-чувствительным процессом, зависящим от частоты плазмонного резонанса. В докладе обсуждаются и другие возможности повышения эффективности генерации и выхода рентгеновского излучения.

Работа поддержана проектом РФФИ N18-29-20090.

#### Список литературы

1.В.М.Гордиенко, А.Б.Савельев. Фемтосекундная плазма в плотных наноструктурированных мишенях. Новые подходы и перспективы. // УФН. -1999.- Т.169.-1.- С.78–80.

А.Е. ЕВСИН<sup>1</sup>, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ<sup>1</sup>, А.В. ГРУНИН<sup>1</sup>, А.С. ДРОЗД<sup>1</sup>,  
В.А. КУРНАЕВ<sup>1</sup>, Я.А. САДОВСКИЙ<sup>1</sup>, И.А. СОРОКИН<sup>1</sup>,  
Н.А. ВОРОНА<sup>2</sup>, А.В. ГАВРИКОВ<sup>2</sup>, А.О. СЕРОВ<sup>2</sup>, В.П. СМИРНОВ<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО И ПЛАЗМЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОРОШКА ОКСИДА ЦЕРИЯ**

Исследовалось восстановление порошка оксида церия при нагреве в вакууме и в водороде, а также при облучении варгоновой плазме дугового разряда при температурах 1100-2100 К на различных подложках. Показано, что при термическом воздействии восстановление оксидного порошка обусловлено взаимодействием с подложкой. На молибденовой подложке оксид восстанавливался, начиная с 1800 К, на танталовой подложке восстановления не наблюдалось до 2100 К. При плазменном воздействии восстановление оксида начиналось уже при 1500-1600 К, причем подложки не участвовали в процессе восстановления.

A.E. EVSIN<sup>1</sup>, L.B. BEGRAMBEKOV<sup>1</sup>, A.V. GRUNIN<sup>1</sup>, A.S. DROZD<sup>1</sup>,  
V.A. KURNAEV<sup>1</sup>, Ya.A. SADOVSKIY<sup>1</sup>, I.A. SOROKIN<sup>1</sup>,  
N.A. VORONA<sup>2</sup>, A.V. GAVRIKOV<sup>2</sup>, A.O. SEROV<sup>2</sup>, V.P. SMIRNOV<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia  
<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow, Russia

## **FEATURES OF THERMAL AND PLASMA REDUCTION OF CERIA POWDER**

The reduction of ceria powder under both heating and exposition in argon arc at 1100-2100 K on various substrates is investigated. Annealing causes the reduction of the powder due to its interaction with the substrate. The reduction begins at 1800 K on molybdenum, whereas on tantalum it was not observed until 2100 K. Plasma reduction of the powder begins at 1500-1600 K, and the substrate does not participate in the process.

Необходимость решения проблемы накопления отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) требует развития методов его регенерации. Один из них – метод плазменной сепарации, при котором металлические компоненты оксидного ОЯТ испаряются и ионизируются, после чего ионы разделяются по массам в плазме, инициируемой в скрещенных  $E \times H$  полях. Разработка плазменного сепаратора выявила необходимость испарения металлических компонентов ОЯТ из жидкой фазы, в то время как их испарение в составе оксидов происходит из твердого состояния. В связи с

этим, важнейшим этапом, предшествующим переработке оксидного ОЯТ методом плазменной сепарации, является его восстановление до металла.

В работе исследовались закономерности восстановления при термическом и плазменном воздействии порошка оксида церия, выбранного в качестве вещества, моделирующего ОЯТ. В первой серии экспериментов порошок выдерживался при 1200-2100 К на молибденовой и танталовой подложках в вакууме ( $P_{\text{ост}}=2 \times 10^{-4}$  Торр) и в водороде ( $P_{\text{H}_2}=1 \times 10^{-2}$  Торр). Во второй серии порошок облучался в аргонной плазме дуги ( $U=15-25$  В) при 1100-1700 К ( $j=15-90$  А/см<sup>2</sup>) в разреженном газе ( $P_{\text{Ar}}=150$  Торр,  $P_{\text{ост}} \sim 10^{-2}$  Торр) и при 1200-1950 К ( $j=45-150$  А/см<sup>2</sup>) на атмосфере.

Восстановление порошка молибденовой подложке в вакууме начиналось при 1900 К. Выдержка при 2100 К в течение 0.5 мин приводила к восстановлению оксида до металла и полному испарению металла, причем в продуктах испарения был обнаружен молибден. На танталовой подложке восстановления и существенного испарения порошка не наблюдалось вплоть до 2100 К. При нагреве в водороде температура восстановления порошка на молибдене уменьшилась на 100 К, в то время как на тантале восстановления при  $T \leq 2100$  К, по-прежнему, не происходило.

Результаты указывают на то, что оксид церия восстанавливается на молибдене при  $T \geq 1800$  К в результате реакций с подложкой:  $CeO_2 + (2/x) \cdot Mo = Ce + (2/x) \cdot MoO_x$ . Данные реакции термодинамически невыгодны, однако при быстром удалении продуктов из зоны реакции, их протекание, по-видимому, возможно. Водород способствует протеканию реакций, образуя воду. Отсутствие подобных реакций порошка с танталом до 2100 К может объясняться меньшей упругостью паров оксидов тантала.

Восстановление порошка в плазме дугового разряда наблюдалось на обеих подложках уже при 1500-1600 К на поверхности порошка, как при давлении аргона  $P_{\text{Ar}}=150$  Торр, так и в дуге на атмосфере. Порошок в зоне контакта с подложкой находился при 1200-1300 К и оставался невосстановленным. Следовательно, в данном случае реакции между порошком и подложкой играют незначительную роль в восстановлении, которое происходит, главным образом, в результате воздействия плазмы на порошок.

Сравнительно низкие температуры плазменного восстановления порошка оксида церия и отсутствие расхода контактирующих с порошком материалов указывают на возможность большого ресурса работы, как самого устройства восстановления, так и его нагревательных элементов. Поэтому, процесс плазменного восстановления ОЯТ можно считать перспективным для использования в качестве предварительного этапа подготовки ОЯТ к загрузке в плазменный сепаратор.

А.Е. ЕВСИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, И.С. КУДАШЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ОКСИДИРОВАНИЕ ЦИРКОНИЯ В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ**

В работе изучались закономерности оксидирования циркония в плазме  $\text{He}+25\%\text{O}_2$ . Показано, что времена, требуемые для образования на цирконии оксидных слоев равной толщины, при выдержке в плазме ( $T=400^\circ\text{C}$ ,  $P=1\times 10^{-3}$  Торр) в  $\sim 10^4$  раз меньше, чем в газе в тех же условиях. Исследована роль распыляющего воздействия ионов плазмы на увеличение толщины оксидного слоя при различных энергиях облучающих ионов.

A.E. EVSIN, L.B. BEGRAMBEKOV, I.S. KUDASHEV

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

## **OXIDATION OF ZIRCONIUM IN HELIUM-OXYGEN PLASMA**

Features of zirconium oxidation in  $\text{He}+25\%\text{O}_2$  plasma were studied. It is shown that formation of the oxide layer on zirconium in plasma ( $T=400^\circ\text{C}$ ,  $p=1\times 10^{-3}$  Torr) occurs  $\sim 10^4$  times faster than in neutral gas of the same conditions. The effect of sputtering on the increase of the oxide layer thickness is investigated at various ion energies.

Циркониевые компоненты активной зоны легководящего реактора подвергаются коррозии в результате взаимодействия с водным теплоносителем. Для продления их ресурса разрабатываются новые сплавы и защитные покрытия, что требует проведения дореакторных испытаний. Традиционные коррозионные испытания заключаются в выдержке образцов в воде или паре. Недостатком данных методов является их большая продолжительность (десятки тысяч часов). Кроме того, в традиционных испытаниях отсутствуют продукты радиолиза воды, которые есть в активной зоне реактора и влияют на коррозию [1].

Качественный состав частично-ионизированной водородно-кислородной плазмы в большей степени соответствует составу активной зоны реактора, поскольку помимо молекул воды, плазма содержит в себе атомы и ионы водорода и кислорода, ОН-радикалы и другие частицы, присутствующие в теплоносителе [2]. При этом концентрация этих частиц в плазме выше, чем в активной зоне реактора, поэтому поверхностные реакции, инициирующие оксидирование циркония, должны протекать интенсивнее. Это позволяет рассматривать плазменное облучение в

качестве возможного метода ускоренных коррозионных испытаний, альтернативного выдержке в воде/паре.

В данной работе изучались различные аспекты плазменного оксидирования циркония. Поскольку водород в атомарном и ионизированном состоянии является сильным восстановителем, в экспериментах использовалась смесь кислорода с гелием. Образцы сплава Э110 (Zr-1% Nb) облучались ионами плазмы He+25%O<sub>2</sub> (P=1×10<sup>-3</sup>Torr) с энергиями 20, 500 и 1000 эВ, при температурах 400° С и 560° С, в течение 10-60 мин. Толщина оксидного слоя вычислялась по изменению массы образца в предположении предельной стехиометрии оксидного слоя (ZrO<sub>2</sub>). При энергиях ионов 500 и 1000 эВ учитывалась убыль массы образца, вызванная распылением.

Сравнение результатов экспериментов по выдержке образцов в газовой среде He+25%O<sub>2</sub> при T=400°С и в плазме в аналогичных условиях (энергия ионов ≈20 эВ) показало, что оксидный слой одной и той же толщины при выдержке в плазме формируется в ~10<sup>4</sup> раз быстрее. Энергия ионов плазмы недостаточна для того, чтобы повлиять на диффузию кислорода в оксидном слое, поэтому причиной ускорения роста слоя при выдержке образцов в плазме следует считать интенсификацию поверхностных реакций, вызванную участием в них атомов и ионов плазмы.

При более высоких энергиях облучающих ионов плазмы толщина оксидного слоя определялась балансом скоростей роста слоя и его распыления. В случае облучения образца ионами с энергией 500 эВ (T=400°С) возросшая скорость распыления привела к тому, что толщина оксидного слоя оказалась в 3.5 раза меньше, чем при выдержке в плазме тех же условиях. При увеличении энергии ионов до 1000 эВ (T=560°С) предполагаемое ускорение роста оксида за счет увеличения температуры, ширины зоны торможения ионов и дефектообразования, практически нивелировалась распылением поверхности и, в результате, скорость роста оксида практически не отличалась от наблюдавшейся при выдержке в плазме.

Полученные результаты позволяют заключить, что для ускорения роста оксидного слоя необходимо увеличение плотности ионного потока и его энергии до величин, соответствующих меньшей скорости распыления, а также определение оптимальной концентрации кислорода в плазме.

#### *Список литературы*

1. Burns W. G., Moore P. B. // Radiation Effects 1976. Vol. 30, P. 233–242.
2. Jiménez-Redondo M., Carrasco E., Herrero V. J. and others // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol.24, art. no. 015029

И.Ю. КАЛАШНИКОВ<sup>1,4</sup>, П.Д. ШАРДОННЕ<sup>2</sup>, В.М. ЧЕЧЕТКИН<sup>1,3,4</sup>,  
А.В. ДОДИН<sup>5</sup>, В.И. КРАУЗ<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

<sup>2</sup>Univ. Grenoble Alpes, USMB, CNRS, LAPTh, F-74000 Annecy, France

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

<sup>4</sup>Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

<sup>5</sup>Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернберга МГУ

## **ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ДЖЕТАХ И ПРОБЛЕМА ИХ КОЛЛИМАЦИИ**

Будут представлены результаты численного моделирования распространения последовательности плазменных сгустков в лабораторных условиях и в астрофизической среде. Физические и геометрические параметры моделирования были выбраны близкими к параметрам установки ПФ-3 (Курчатовский институт) и джета звезды RW Aur. Обнаружено, что область низкой плотности, образовавшаяся после распространения первого сгустка, играет важную роль в коллимации последующих. Предполагая только тепловое расширение последующих выбросов, были сделаны качественные оценки времени, необходимого для заполнения этой области окружающим веществом, и угла рассеяния струи. Эти оценки согласуются с наблюдениями и результатами нашего моделирования.

I. KALASHNIKOV<sup>1,4</sup>, P. CHARDONNET<sup>2</sup>, V. CHECHETKIN<sup>1, 3</sup>,  
<sup>4</sup>A. DODIN<sup>5</sup>, V. KRAUZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Univ. Grenoble Alpes, USMB, CNRS, LAPTh, F-74000 Annecy, France

<sup>3</sup>National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow M.V. Lomonosov State University, Russia

## **PROPAGATION DYNAMICS OF SUCCESSIVE EMISSIONS IN LABORATORY AND ASTROPHYSICAL JETS AND PROBLEM OF THEIR COLLIMATION**

The results of numerical simulation of the propagation of a sequence of plasma knots in laboratory conditions and in the astrophysical environment will be presented. The physical and geometric parameters of the simulation have been chosen close to the parameters of the PF-3 facility (Kurchatov Institute) and the jet of the star RW Aur. It

was found that the low-density region formed after the first knot propagation plays an important role in the collimation of the subsequent ones. Assuming only the thermal expansion of the subsequent emissions, qualitative estimates of the time taken to fill this area with the surrounding matter and the angle of jet scattering have been made. These estimates are consistent with observations and results of our modeling.

Проведя численное моделирование гипотетической ситуации, при которой выбросы плазмы в установке ПФ-3[1] могут происходить один за другим мы увидели, что образующаяся вслед за первым джетом полость с низкой концентрацией плазмы препятствует образованию сильной ударной волны, джетом, следующим за первым.

Таким образом большая часть вещества остается в первоначальных границах сгустка [2,3]. Сам же сгусток расширяется, по-видимому, благодаря лишь тепловому расширению в окружающую среду. Осуществляя аналогичное моделирование с параметрами, близкими к параметрам наблюдаемого джета звезды RW Aur мы обнаружили тот же эффект.

Далее, делая оценку угла разлета плазменных сгустков мы предположили, что их движение представляет из себя суперпозицию поступательного движения вдоль начального направления распространения и теплового расширения в вакуум:

$$\alpha = 2 \arctg(M_*^{-1} + \frac{R_0}{L}),$$

где  $M_*^{-1}$  – внутренне число Маха,  $R_0$  - начальный радиус плазменного сгустка,  $L$ –путь, пройденный сгустком.

Эта оценка заведомо завышена сверху, так как не учитывалось влияние ни окружающей среды, ни магнитного поля, она все равно хорошо согласуется с результатами моделирования и астрономическими наблюдениями, что демонстрирует ее правильность.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-29-21006мк.

#### *Список литературы*

1. K.N. Mitrofanov, V.I. Krauz, V.V. Mialton, E.P. Velikhov, V.P. Vinogradov, Yu.V. Vinogradova. *ЖЕТР***119** 910 (2014).
2. I.Yu. Kalashnikov, V.I. Krauz, V.M. Chechetkin. *Journal of Physics: Conference Series* **798** 012008 (2017).
3. I. Kalashnikov, P. Chardonnet, V. Chechetkin, A. Dodin, and V. Krauz. Propagation dynamics of successive emissions in laboratory and astrophysical jets and problem of their collimation. *Physics of Plasmas* **25**, 062901 (2018).

А.Р. КАРИМОВ<sup>1,2,3</sup>, С.А. ТЕРЕХОВ<sup>2</sup>, А.Е. ШИКАНОВ<sup>2</sup>,  
П.А. МУРАД<sup>4</sup>, К.И. КОЗЛОВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова, Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Morningstar Applied Physics, LLC Vienna, VA 22182, USA*

## УСКОРЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ

В рамках гидродинамического описания исследуется динамика ускорения многокомпонентной плазмы, находящейся в скрещенных магнитных полях, за счет передачи импульса между макроскопическими степенями свободы плазменного потока. Для потока, состоящего из электронов, протонов и тяжелых отрицательных многозарядных пылевых частиц, представлены результаты, демонстрирующие различную динамику ускорения многокомпонентной плазмы. Определены условия, при которых макроскопические частицы захватываются и ускоряются плазменным потоком.

A.R. KARIMOV<sup>1,2,3</sup>, S.A. TEREKHOV<sup>2</sup>, A.E. SHIKANOV<sup>2</sup>,  
P.A. MURAD<sup>4</sup>, K.I. KOZLOVSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems RAS, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Morningstar Applied Physics, LLC Vienna, VA 22182, USA*

## THE ACCELERATION OF MULTICOMPONENT PLASMA

Based on the hydrodynamic description, the acceleration of multicomponent plasma flow consisting from electrons, protons, and heavy multiply charged negative dust particles in crossed magnetic fields has been investigated. The effect of acceleration is caused by momentum transfer between the macroscopic degrees of freedom for a plasma flow. The results demonstrating different dynamics of the acceleration of multicomponent plasma are shown. The present analysis shows that there are conditions when the charged macroscopic particles have been trapped and then the ones accelerated in the main plasma flow.

Метод ускорения макроскопических тел, основанный на непосредственном преобразовании электромагнитной энергии импульса тока в кинетическую энергию ускоряемых тел за счет действия силы

Ампера на плазменный сгусток, возникающий в рельсовых электромагнитных ускорителях (РЭУ), имеет неоспоримое преимущество перед другими способами создания высокоскоростных потоков материи. В данном случае величина достижимой скорости метания макротел определяется только процессами накопления и выделения электрической энергии: для достижения больших скоростей необходимо увеличивать мощность используемых импульсных источников тока, что имеет технические ограничения. Другой причиной, ограничивающей максимальную скорость, является развитие неустойчивости плазменного поршня, наиболее сильно проявляющаяся при изменении тока в цепи ускорителя [1,2].

В настоящей работе обсуждается механизм ускорения заряженных макроскопических частиц за счет их захвата вращающимся плазменным потоком, который ускоряется в скрещенных магнитных полях [3,4]. Данный механизм рассматривается на примере пылевой плазмы, в которой помимо однозарядных ионов и электронов содержатся массивные многозарядные макроскопические частицы, составляющие относительно малую долю от полного числа частиц.

Работа А.Р.К., А.Е.Ш. и К.И.К. поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 14.575.21.0169 (RFMEFI57517X0169).

#### *Список литературы*

1. Г.В. Носов, К расчету параметров и эффективности преобразования энергии рельсотроном // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. No 2. С. 70.
2. С.В. Бобашев и др., Сильные ударные волны и особенности течения ударно-сжатых газов в каналах рельсовых ускорителей // Журнал технической физики. 2015. Т.85. No 1. С. 39.
3. A. R. Karimov, P. A. Murad, Acceleration of Rotating Plasma Flows in Crossed Magnetic Fields // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Vol. 45. P. 1710.
4. A. R. Karimov, P. A. Murad, Plasma Thruster using Momentum Exchange in Crossed Magnetic Fields // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. Vol. 46. P. 882.

С.А. КАРПОВ<sup>1,2</sup>, И.Ф. ПОТАПЕНКО<sup>2</sup>, В.Ю. БЫЧЕНКОВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н.Л. Духова, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия,

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

## **ЭЛЕКТРОННАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ РЕЗКОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ**

Представлено сравнение результатов кинетического и гидродинамического моделирования релаксации резкого градиента электронной температуры в низкоплотной лазерной плазме. Получено существенное отклонение электронной функции распределения от максвелловской в надтепловой области возникающее в процессе релаксации. Дана оценка вклада горячих электронов в плотность числа частиц и среднюю энергию, их влияние на предпрогрев плазмы и распространение плазменных волн.

S.A. KARPOV<sup>1,2</sup>, I.F. POTAPENKO<sup>2</sup>, V.Yu. BYCHENKOV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Dukhov Research Institute of Automatics (VNIA), Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia,

<sup>3</sup>P.N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia

## **ELECTRON DISTRIBUTION FUNCTION IN PRESENCE OF THE STEEP TEMPERATURE GRADIENT IN LASER- PRODUCED PLASMA**

The kinetic and hydrodynamic simulations of the steep electron temperature gradient relaxation in a low-density laser-produced plasma are compared. A significant deviation of the electron distribution function from the Maxwellian in the nonthermal region due to the relaxation process is obtained. An estimate of the hot electrons contribution to the particle number density and mean energy, their influence on plasma preheating and plasma wave propagation is computed.

При взаимодействии лазерного излучения большой интенсивности с плазмой возникают значительные градиенты температуры и плотности, что ставит под сомнение возможность описания реальных лазерных экспериментов в рамках классической гидродинамики. На данный момент накоплен целый ряд экспериментальных данных, подтверждающих представления о нелокальном характере теплопереноса в лазерной плазме и свидетельствующих о невозможности описания теплового переноса в рамках гидродинамических моделей, приводящих, например, к значительной переоценке потока энергии. Вопрос о величине теплового

потока является одним из ключевых для успешного осуществления лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), поскольку основная часть энергии падающего лазерного излучения поглощается достаточно далеко от области горения - вблизи критической плотности, а затем переносится вглубь плазмы тепловым потоком электронов, от величины которого зависят темп нагрева, температура и сжатие мишени.

В данной работе представлены результаты численного моделирования релаксации профиля электронной температуры с резким начальным градиентом в низкоплотной лазерной плазме. Моделирование было выполнено с помощью оригинального 1D2V кинетического кода, в котором для нелинейного интеграла столкновений Ландау используется полностью консервативная конечно-разностная схема [1], совмещенная с асимптотически корректной схемой [2] для расчета самосогласованного электрического поля.

В работе изучены пространственная и временная эволюция профилей электронной температуры и теплового потока, структура электронной функции распределения (ЭФР) в пространстве скоростей. Результаты кинетического моделирования существенно отличаются от данных аналогичных гидродинамических расчетов. Проведенные расчеты демонстрируют наличие степенного «хвоста» ЭФР, полученного ранее для специфических режимов теплопереноса в работе [3], и показывают, что быстрые надтепловые электроны дают значительный вклад в среднюю кинетическую энергию, обеспечивая существенный предпрогрев плазмы. Полученная степенная зависимость для «хвоста» ЭФР на фронте тепловой волны имеет важное значение для широкого круга процессов связанных с лазер-плазменным взаимодействием, в частности, в данной работе демонстрируется отличие коэффициента затухания Ландау по сравнению с максвелловским распределением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (17-51-52007 МНТ\_а, 18-32-00406 мол\_а).

*Список литературы*

1. Potapenko I.F., Bobylev A.V., Mossberg E.// Transp. Theory Stat. Phys. 2008. Vol. 37, P. 113–170.
2. Guisset S., Brull S., Dubroca B. and others// Comm. in Comp. Phys. 2016. Vol. 19, № 2, P. 301–328.
3. Rochkarev S.G., Bychenkov V.Yu., Rozmus W.// Phys.of Plasmas, 2004, Vol. 11, P. 3997-4007

Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ**

Проводилось изучение свойств разряда в электролите в зависимости от материала электродов. Изучались колебательные процессы разряда в частотном диапазоне 10 кГц-500 МГц. Исследована микроструктура поверхности вольфрамовых, танталовых и титановых электродов. Регистрируется возникновение нитевидных структур диаметром 0,2-1 мкм и образований сферической и овальной форм с размерами 1-20 мкм. Наблюдается появление микропористой поверхности с диаметрами отверстий около 0,8-2 мкм.

D.L. KIRKO, A.S. SAJOLOV

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

## **RESEARCH OF PLASMA INFLUENCE TO ELECTRODE SURFACE AT ELECTROLYTE DISCHARGE**

The research of dependence of the electrolyte discharge properties from electrode matter was made. The oscillation processes of the discharge in region 10 kHz-500 MHz were investigated. The micro structure of electrodes from tungsten, tantalum and titanium was researched. The origin of thread like structures with diameter 0,2-1 μm and spherical and oval formations with dimensions 1-20 μm is registered. The appearance of a micro porous surface with a hole diameter near 0,8-2 μm is observed.

При разряде в электролите регистрируется движение тока через электролит и возникновение свечения около электродов. Данному разряду свойственно появление колебательных и волновых процессов [1-4]. Разряды в электролитах используются в настоящее время для сложных видов обработки и полировки поверхности материалов, а также поиска более экономичных способов получения водорода [1,2].

В данной работе разряды создавались в сосудах цилиндрической формы, изготовленных из оргстекла диаметром 8-15 см и объемом 90-250 см<sup>3</sup>. Использовались электролиты на основе карбоната натрия, гидрокарбоната натрия, и гидроксида калия. Концентрация электролита выбиралась в диапазоне 0,3-0,8 М. В качестве катода применялся стержень из титана, вольфрама, и тантала диаметром 0,3-1 мм, расположенный в керамической втулке. Катод располагался в электролите на расстоянии 0,5-4 см от поверхности жидкости. Для анода

использовалась пластина из нержавеющей стали или молибдена толщиной 0,2-0,5 мм. Рабочее значения напряжения на разряде находилось в диапазоне 110-240 В, величина тока составляла 0,2-1,0 А при частоте повторения импульсов 100 Гц. Регистрация импульсов тока разряда и электрических колебаний проводилась с помощью осциллографа Tektronix TDS 2024В.

Исследовалось влияние материала электродов на формирование пробоя разряда в электролите, свойства разряда и колебательные процессы. При фиксированной концентрации электролита существенного влияния материала катода на напряжение пробоя обнаружено не было. Разряд имел светло-желтый цвет при катодах из тантала и вольфрама, и белый при катоде из титана. Были зарегистрированы электрические колебания в диапазоне 80 кГц-150 МГц при использовании танталовых и вольфрамовых электродов и построены спектры данных колебаний.

Проводилось изучение изменения поверхностной структуры материала электрода под воздействием разряда в электролите. В работе использовались микроскопы Hitachi TM1000 и VEGA 3 SEM. После воздействия разряда вольфрамовые электроды приобретают трещины в продольном направлении шириной 1-20 мкм. На отдельных участках поверхности наблюдается образование тонких нитей толщиной 0,2-1 мкм. Данные нити имеют длину в диапазоне 30-50 мкм и располагаются на отдельных площадях. Происходит возникновение образований, напоминающих хлопья размерами 5-40 мкм. На поверхности титановых электродов регистрируется появление сгустков сферической или овальной формы размерами 1-20 мкм. Поверхность данного металла содержит микропоры с размерами 0,8-2 мкм, которые располагаются хаотически на поверхности. Поверхность танталовых катодов под действием разряда имела разрушения и растрескивания. Трещины имели ширину в диапазоне 0,5-2 мкм и покрывали отдельные участки рабочей поверхности электрода. Также на поверхности наблюдаются углубления, каверны неправильной формы размерами 1-20 мкм. Это, по-видимому, связано с сильным воздействием, разряда на отдельные участки материала.

#### *Список литературы*

1. Гайсин Ал.Ф., Насибуллин Р.Т. // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 10, С. 959-966.
2. Канарев Ф.М. Низкоамперный электролиз воды. Изд. Краснодар. Унив., 2010. 81 с.
3. КиркоД.Л. // ЖТФ. 2015. Т. 85, № 4, С.28-31.
4. KirkoD.L., SavjolovA.S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 941, P.012018.

К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.Е. ШИКАНОВ,  
А.Р. КАРИМОВ, А.А. ИСАЕВ, А.А. ПЛЕТНЕВ,  
О.В. ДЕРЯБОЧКИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ*

## **КОЛЛЕКТИВНОЕ УСКОРЕНИЕ ИОНОВ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ КОНИЧЕСКОЙ СПИРАЛИ**

Исследовалось коллективное ускорение ионов лазерной плазмы в магнитном поле, генерируемом мощным быстро нарастающим импульсом тока в малоиндуктивной конической спирали. На основе коллекторных измерений получены скорости ионов для ряда элементов, существенно различающихся по атомной массе. Рассмотрены особенности ускорения дейтронов при изменении параметров генератора тока и геометрии спирали и показана возможность достижения скорости до  $10^8$  см/с. Приводятся математическая модель ускорения и сравнение расчета с экспериментом.

K.I. KOZLOWSKII, E.D. VOVCHENKO, E.A. SHIKANOV,  
A.R. KARIMOV, A.A. ISAEV, A.A. PLETNEV,  
O.V. DERYABOCHKIN

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **COLLECTIVE ACCELERATION OF IONS IN A PULSED MAGNETIC FIELD OF CONICAL SPIRAL**

The collective acceleration of laser plasma ions in a magnetic field generated by a powerful high-speed pulse of current in a low-inductive conical spiral was studied. Based on collector measurements the velocity of the ions are determined for a number of elements, which significantly differ in atomic weight. The features of the acceleration of deuterons when changing the parameters of the current generator and the geometry of the spiral are considered. The possibility of reaching a speed of up to  $10^6$  m/s is shown. The mathematical model of acceleration and comparison of calculation with experiment are given.

В работе [1] рассмотрено ускорение дейтронов, извлекаемых из лазерной плазмы в быстро нарастающем магнитном поле, с целью генерации нейтронов. Для получения лазерной плазмы применен Nd:YAG лазер ( $\lambda = 1,06$  мкм), генерирующий в режиме модулированной добротности импульсы излучения с энергией  $W \leq 0,85$  Дж и длительностью  $\tau \approx 10$  нс. При фокусировке его излучения на диэлектрическую мишень из дейтерированного полиэтилена  $(CD_2)_n$  в вакууме  $\sim 10^{-4}$  торр достигалась плотность мощности порядка

$5 \cdot 10^{11}$  Вт·см<sup>-2</sup>. Быстронарастающее магнитное поле ( $2 \cdot 10^7$  Тл/с) создавалось при разряде генератора Аркадьева-Маркса на коническую спираль с индуктивностью 0,65 мкГн. В этом эксперименте для наиболее быстрой группы дейтронов получена скорость  $\sim 3 \cdot 10^8$  см/с, что соответствует энергии дейтронов  $\sim 100$  кэВ.

Логичным продолжением работ, основанным на анализе физической картины ускорения, стал переход к более быстрым магнитным полям ( $10^8$  Тл/с) за счет увеличения тока в конической спирали до 10 кА. Использовалась схема генератора тока с зарядом емкости от импульсного высоковольтного трансформатора ( $U \approx 100$  кВ) и разрядом на коническую спираль через воздушный разрядник-обостритель. При этом достаточно большой временной разброс обострителя не позволил получить надежную синхронизацию лазерной плазмы с магнитным полем, а процент «удачных» импульсов, в которых достигалась максимальная скорость дейтронов  $\sim 3 \cdot 10^8$  см/с, был невысок.

В окончательном варианте генератора тока авторы применили управляемый разрядник с искажением поля, а рабочее напряжение было уменьшено до 25 кВ. Это позволило отказаться от импульсного трансформатора, уменьшить индуктивность разрядного контура и сохранить скорость нарастания поля ( $10^8$  Тл/с).

На основе времяпролетных коллекторных измерений исследована эффективность ускорения ионов при варьировании временной задержки между лазерным импульсом и началом нарастания магнитного поля. Оптимальная задержка составила величину 150–250 нс. Кроме синхронизации выбиралась и оптимальная геометрия конической спирали, в которой варьируемым параметром была величина угла раствора конуса  $\gamma = 90 - 120^\circ$ .

Для оптимальных условий ускорения определены средние и максимальные скорости ионов для элементов, существенно различающихся по атомной массе: от легких  $v_{\text{ср}} \approx 8,5 \times 10^7$  см/с (литий) до тяжелых  $v_{\text{ср}} \approx 7,0 \times 10^7$  см/с (медь) и  $v_{\text{ср}} \approx 6,3 \times 10^7$  см/с (свинец).

Рассмотрена математическая модель ускорения плазмы в аксиально-симметричном быстронарастающем магнитном поле, выполнены расчеты и проведено сравнение с экспериментом.

Данная работа выполнена в рамках соглашения №14.575.21.0169 о предоставлении субсидии Минобрнауки РФ.

#### *Список литературы*

I. A. Isaev, K. Kozlovskiy, A. Shikanov and E. Vovchenko. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 941 (2017) 012016, doi:10.1088/1742-6596/941/1/012016

Д.В. КОЛОДКО, И.А. СОРОКИН, Е.Г. ШУСТИН  
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.  
Котельникова РАН, Фрязино Московской обл., Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## **МОДЕЛЬ СЛОЯ ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

Представлены результаты PiC моделирования в коде KARAT пристеночного слоя пучково-плазменного разряда без магнитного поля. Рассмотрены условия выхода разряда в стационар и развития пучковых неустойчивостей в нем. Проведена экспериментальная апробация полученных модельных стационарных распределений плотности плазмы ППР и энергетического распределения ионного потока на пристеночный электрод.

D.V. KOLODKO, I.A. SOROKIN, E.G. SHUSTIN  
*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino Branch, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow oblast, Russia*  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **MODEL OF A PLASMA LAYER FORMED BY AN ELECTRON BEAM**

The article presents the results of PiC simulation of the beam-plasma discharge sheath without a magnetic field in KARAT code. We managed to calculate the model of setting of the discharge into a stationary state and the development of beam instabilities. We also experimentally verified the obtained model distributions of the BPD plasma density and the ion flux energy to the model electrode.

Тенденции развития микро- и наноэлектроники требуют создания суб-10 нм элементов и построения электронных приборов на новых принципах, а, следовательно, и создания новых технологий и средств, их реализующих. Как было показано в работах [1-4], плазмохимический реактор, использующий в качестве источника плазмы пучково-плазменный разряд (ППР), при слабом или нулевом магнитном поле в рабочей камере обладает явными преимуществами при решении задач получения и обработки наноразмерных пленок и структур. По сравнению с традиционно используемыми в промышленных установках ВЧ и СВЧ разрядами в ППР есть возможность точно регулировать среднюю энергию потока ионов, воздействующих на обрабатываемую поверхность, в диапазоне 10 – 100 эВ. Такие низкие энергии ионов обеспечивают обработку поверхности (травление или осаждение пленок) с минимальной плотностью радиационных дефектов.

В работе представлены результаты PiC моделирования (в кинетическом приближении методом макрочастиц) в коде KARAT процессов образования пристеночного слоя ППР. В модели электронный пучок инжектируется в заземленную вакуумную камеру (диаметр 30 см, длина 50 см), заполненную рабочим газом (Ar). Внешнее магнитное поле отсутствует. На расстоянии 15 см от пучка расположен электрод, на который мог подаваться потенциал смещения, имитирующий поверхность обрабатываемого образца.

Моделируется развитие пучковой плазмы и пучковой неустойчивости, благодаря которой происходит бесстолкновительный нагрев плазменных электронов и переход в режим ППР. Рабочий диапазон давлений плазмообразующего газа, в таком разряде, оказывается на 1-2 порядка ниже, чем в реакторах на ВЧ разряде. Это обеспечивает не только малый разброс ионов по энергиям, но и высокую анизотропию потока ионов. Расчет образования плазмы в объеме продолжается до момента, когда радиальное распределение плотности плазмы в плоскости электрода и энергетический спектр потока ионов на электрод не становятся постоянными во времени.

Результаты моделирования были апробированы на плазмохимическом реакторе с ППР без магнитного поля. Стационарное распределение плотности плазмы разряда и энергоспектр ионного потока на пристеночный электрод были измерены с помощью подвижного зонда Ленгмюра и встроенного электростатического цилиндрического энергоанализатора, соответственно. Было проведено сравнение полученных модельных и экспериментальных данных. Наблюдается качественное совпадение результатов.

Полученная модель ППР позволит оптимизировать режимы процессов мягкого травления наноструктур в пучково-плазменном реакторе [5]. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00884.

#### *Список литературы*

1. Исаев Н.В. и др. // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 73.
2. Тараканов В.П., Федоров Ю.В., Шустин Е.Г. // ВАНТ. 2008. № 4. С. 169.
3. Shustin E.G., et al. // Vacuum. 2009. V. 83. Issue 11. P. 1350.
4. Shustin E.G., et al. // Vacuum. 2011. V. 85. P. 711.
5. Исаев Н.В. и др. // ПТЭ. 2014. № 1. С. 124–127.

А.А. КОТКОВ, Д.В. СИНИЦЫН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,  
А.Ю. КОЗЛОВ, Д.В. МОКРОУСОВА, А.К. КУРНОСОВ  
*ФИАН, Москва, Россия*

## **КРИОГЕННЫЙ ОЗОНАТОР**

Экспериментально продемонстрирована возможность повышения скорости синтеза озона при криогенном охлаждении объемного барьерного разряда в потоке кислорода атмосферного давления.

A.A. KOTKOV, D.V. SINITZYN, Yu.M. KLIMACHEV,  
A.Yu. KOZLOV, D.V. MOKROUSOVA, A.K. KURNOSOV  
*Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia*

## **CRYOGENIC OZONATOR**

The possibility of increasing the rate of ozone synthesis during cryogenic cooling of a volume barrier discharge in an atmospheric pressure oxygen stream was experimentally demonstrated.

Изучение криогенной плазмы имеет фундаментальное значение для развития теории процессов в неидеальной плазме, поскольку при малых значениях тепловой энергии массивных частиц проявляются элементарные и коллективные процессы в ионизованных газах.

Схема криогенного озонатора с объемным барьерным разрядом представлена на Рис. 1. Барьер образован трубкой 1 из кварцевого стекла. По оси трубки установлен центральный электрод 2. Внешний электрод 3 изготовлен из латунной сетки (объем газового разряда 1,5 см<sup>3</sup>). Напряжение частотой 26 кГц подавалось на электроды с высоковольтного трансформатора 4 (SC 0305), запитанного от электронного трансформатора 5 (TRA 110-250W). Ось озонатора установлена вертикально, при этом газовый поток проходил через разрядный промежуток сверху вниз. На кварцевую трубку плотно надевалась криогенная ванна 6, в которую заливался жидкий азот. Внешний сетчатый электрод устанавливался либо внутри ванны, либо под ней. Кислород 99,5% подавался на вход озонатора при атмосферном давлении через осушитель 7 и поплавковый ротаметр 8 (LZM-15ZT; с регулятором потока). Скорость потока кислорода составляла 100 л/ч. После озонатора газ направлялся в измерительную кювету 9 длиной 60 мм. Концентрация озона измерялась с помощью спектрометра 10 (ASP-150) по поглощению излучения ртутной лампы 11 (ДКБУ-5).

Напряжение на электродах измерялось ВВ щупом АСА-6039 (0,9 ГОм). Амплитуда ВВ напряжения  $U_{out}$  превышала 7,5 кВ (Рис. 2). Синусоидальная форма  $U_{out}(t)$  искажалась в момент поджига барьерного разряда, что проявлялось в виде пиков на входном сигнале  $U_{in}(t)$ .

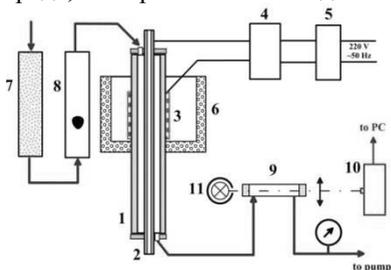


Рис.1. Схема экспериментальной установки (пояснения по тексту)

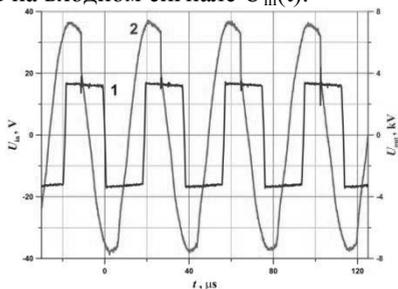


Рис.2. Напряжение на входе (1) и выходе (2) ВВ трансформатора

При отсутствии принудительного охлаждения скорость генерации озона достигала 0,2 г  $O_3$ /ч сразу после включения разряда и постепенно уменьшалась из-за нагрева кварцевой трубки барьерным разрядом. После заполнения криогенной ванны жидким азотом скорость генерации озона возросла в полтора раза до 0,3 г  $O_3$ /ч. При этом часть озона конденсировалась на внутренней стенке охлаждаемой кварцевой трубки, увеличивая толщину барьера. Чтобы избежать конденсации озона, сетчатый электрод был установлен под криогенной ванной, а кварцевая трубка внутри ванны была теплоизолирована поролоновой трубкой. При этом температура внешней стенки кварцевой трубки внутри ванны увеличилась до 150 К, а скорость генерации озона составила примерно 0,25 г  $O_3$ /ч. Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность повышения скорости генерации озона при криогенном охлаждении объемного барьерного разряда в потоке кислорода атмосферного давления. Однако изменение скорости генерации озона было не столь резким, как отмечалось в работе [1], что, вероятно, связано с различием геометрии барьерного разряда и недостаточно высокой мощностью применяемого нами ВВ генератора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-02-00920.

#### Список литературы

1. Masuda S., Koizumi S., Inoue J., Araki H // IEEE transactions on industry applications 1988, vol. 24, №5, p. 928-933.

Е.Д. МАРЕНКОВ<sup>1</sup>, К.М. ГУТОРОВ<sup>1</sup>, И.А. СОРОКИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл., Россия

## **ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ ТЯЖЕЛОЙ ПРИМЕСИ В ПЛАЗМЕ**

Полная нестационарная радиационно-столкновительная модель применена для расчета излучения многоэлектронных атомов в плазме линейных плазменных установок. Проведены эксперименты по измерению пространственного профиля интенсивности излучения вольфрама и молибдена в аргоновой плазме установки ПР-2. Результаты экспериментов сравниваются с результатами моделирования.

E.D. MARENKOV<sup>1</sup>, K.M. GUTOROV<sup>1</sup>, I.A. SOROKIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino Branch, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow oblast, Russia

## **ON THE TEMPORAL EVOLUTION OF HEAVY ATOMS RADIATION IN PLASMA**

A complete radiative-collision model has been used for calculation of radiation intensity of multielectron atoms in plasma of linear plasma devices. Experiments on radiation of molybdenum and tungsten atoms in argon plasma of PR-2 devices have been conducted. The experimental results are compared with modeling.

Хотя штатный режим работы токамака ITER предусматривает нагрузки на элементы вольфрамового дивертора, при котором попаданием вольфрама в диверторную плазму можно практически пренебречь, во время нестационарных процессов, например, ЭЛМов, пристеночная плазма все-таки может оказаться «загрязнена» вольфрамовой примесью. При низких температурах диверторной плазмы вольфрам является довольно слабым излучателем. Однако, поперечный перенос плазмы на больших токамаках часто обуславливается движением блобов – сгустков более горячей и плотной плазмы. Предполагается, что перенос излучения, как основной плазмы, так и примеси, может оказывать влияние на динамику движения блобов. Поэтому представляет интерес расчет интенсивности излучения примеси в условиях пристеночной плазмы.

Надежность таких оценок определяется, в основном, точностью сечений атомных процессов, определяющих излучение: возбуждения, девозбуждения электронным ударом, спонтанного высвечивания,

ионизации. Для тяжелых атомов величины этих сечений известны очень хорошо. Поэтому, первым шагом для надежных оценок влияния излучения примеси, представляется экспериментальная проверка сечений, полученных расчетным путем.

Эксперименты, направленные на решение этой задачи, были проведены для вольфрама и молибдена на установке ПР-2 (МИФИ). С помощью спектрометра измерялась зависимость интенсивности излучения распыленных атомов мишени в плазме от расстояния до мишени. Затем распределение интенсивности рассчитывалось с помощью полной радиационно-столкновительной модели, включающей в себя все доступные уровни энергии.

Как профили интенсивности излучение вольфрама, так и молибдена имеют интересную особенность: интенсивность некоторых линий имеет максимум, расположенный на заметном, порядка 1 см, расстоянии от мишени. Наши расчеты позволяют полностью воспроизвести этот эффект на примере молибдена в хорошем согласии с экспериментальными данными. Подобный максимум интенсивности наблюдался и ранее на других линейных установках и с другими многоэлектронными атомами. Однако, ранее предполагалось, что природа максимума связана исключительно с ионизацией и уходом атомов примеси через боковую поверхность плазменного шнура. Мы показываем, что это не совсем так. Появление максимума связано с особенностями динамики переходов между многими возбужденными уровнями. Ни ионизация, ни уход частиц из объема, не являются необходимыми факторами для его возникновения. Природа медленного роста интенсивности связана с наличием запрещенных в дипольном приближении переходов, для которых коэффициент Эйнштейна спонтанного высвечивания мал, но при этом сечение возбуждение электронным ударом достаточно велико. Наличие таких переходов приводит к тому, что в условиях пристеночной плазмы токамаков временные масштабы эволюции для многих уровней могут быть очень длинными, порядка  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  с. Такая медленная динамика может сказаться на переносе излученной энергии в диверторной плазме, в частности, в режиме блобов.

Работа была поддержана грантом РФФИ 18-32-00208.

И.И. МЕТЕЛЬСКИЙ<sup>1,2</sup>, В.Ф. КОВАЛЕВ<sup>1,2,3</sup>, В.Ю. БЫЧЕНКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматизирующей аппаратуры им. Н.Л. Духова, РОСАТОМ, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, РАН, Москва, Россия*

## **РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ПЛАЗМЕННЫЙ РЕЗОНАНС И ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК В НЕОДНОРОДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ**

Построена теория генерации гармоник в неоднородной плазме на основе механизма релятивистского плазменного резонанса. Изучены спектральные характеристики вторичного излучения, найдены условия проявления релятивистских эффектов и опрокидывания плазменных волн в окрестности критической плотности плазмы. Исследовано влияние релятивистских эффектов движения электронов плазмы на формирование спектров излучения. Проведено сравнение с результатами слабо нелинейной теории.

I.I. METELSKI<sup>1,2</sup>, V.F. KOVALEV<sup>1,2,3</sup>, V.YU. BYCHENKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*All-Russia Research Institute of Automatics, ROSATOM, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia*

## **RELATIVISTIC PLASMA RESONANCE AND HARMONIC GENERATION IN AN INHOMOGENEOUS LASER- PRODUCED PLASMA**

A theory of the harmonic generation in an inhomogeneous plasma based on the relativistic plasma resonance mechanism is constructed. The spectral characteristics of the secondary radiation are studied, the conditions for the relativistic effects manifestation and the plasma wave-breaking in the vicinity of the critical plasma density are found. The influence of relativistic effects of the plasma electrons motion on the emission spectra formation is investigated. A comparison with the results of a weakly nonlinear theory is completed.

Процесс генерации гармоник вызывает интерес как метод диагностики лазерной плазмы и в связи с возможностью получения вторичного излучения на частотах высокой кратности. Генерация гармоник при распространении электромагнитного излучения низкой интенсивности в неоднородной плазме была исследована в [1,2] с использованием теории возмущений. В качестве механизма генерации был рассмотрен эффект плазменного резонанса [3], который заключается в резонансном возрастании потенциального электрического поля в окрестности критической плотности плазмы, где лазерная частота сравнивается с частотой колебаний плазмы. В рамках приближения слабой

нелинейности был получен экспоненциальный закон спадаания амплитуд гармоник с ростом их номера. Выход за рамки теории возмущений был осуществлен авторами работы [4], в которой учитывалась сильная нелинейность движения электронов, но в пренебрежении эффектами релятивизма. Применяя подход, основанный на использовании ренормгрупповых преобразований, они показали возможность существования более плавных спектров излучения в сравнении с результатами слабо нелинейной теории. До сих пор не было получено обобщения нелинейной теории на случай высоких лазерных интенсивностей, когда релятивистские эффекты в окрестности резонанса становятся существенны. Первый шаг на пути решения этой задачи предпринят в работе [5], где показано, что резонансно усиленное плазменное поле может ускорять электроны плазмы до релятивистских скоростей даже в случае нерелятивистских лазерных интенсивностей. Такой сильный нелинейный резонанс качественно меняет процесс генерации гармоник, существенно повышая амплитуды высших гармоник.

В данной работе, с использованием метода ренормгрупповых симметрий, построена теория генерации гармоник на основе механизма релятивистского плазменного резонанса в неоднородной плазме. С учетом релятивистской нелинейности найдены электрическое поле и скорости электронов в окрестности критической плотности плазмы, определяющие нелинейный ток, рассматриваемый в качестве источника излучения в вакуум. Рассчитаны спектральные и угловые характеристики вторичного излучения. Продемонстрированы два эффекта в перестройке спектров излучения относительно нерелятивистского случая – выполаживание спектральной кривой и её модуляция. Для ряда значений параметров лазерно-плазменной системы вычислены спектры излучения, характеризующиеся медленным степенным законом спадаания. Проведено сравнение с результатами слабо нелинейной теории. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №18-32-00406 mol\_a.

*Список литературы*

1. Ерохин Н.С., Захаров В.К., Моисеев С.С. // ЖЭТФ. 1969. Т. 56, С. 179.
2. Владимирский А.Б., Силин В.П. // Физика плазмы. 1980. Т. 6, С. 354.
3. Гершман Б.Н., Гинзбург В.Л., Денисов Н.Г. // УФН. 1957. Т. 61, С. 561.
4. Ковалёв В.Ф., Пустовалов В.В. // ТМФ. 1989. Т. 81, С. 69.
5. Метельский И.И., Ковалев В.Ф., Быченков В.Ю. // Физика плазмы. 2017. Т. 43, №2, С. 169.

А.В. МИШИН, А.А. НЕЧАЕВ, М.А. ГАРАСЁВ,  
А.Н. СТЕПАНОВ, Вл.В. КОЧАРОВСКИЙ  
*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

**ФОРМИРОВАНИЕ ГОРБА ПЛОТНОСТИ НА ФРОНТЕ  
БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ  
ПРИ РАЗЛЁТЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ  
В РАЗРЕЖЕННУЮ**

На основе моделирования методом частиц в ячейках и проведённого качественного анализа процесса образования горба плотности плазмы при абляции мишени фемтосекундным лазерным импульсом показано, что это явление, недавно обнаруженное экспериментально, обусловлено влиянием потока энергичных электронов на пакет ионно-звуковых волн, формирующийся на фронте электростатической ударной волны при разлёте горячей плотной плазмы в разреженную.

A. V. MISHIN, A. A. NECHAEV, M. A. GARASEV,  
A. N. STEPANOV, V. V. KOCHAROVSKY  
*Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod*

**DENSITY BUMP FORMATION AT THE FRONT  
OF A COLLISIONLESS SHOCK WAVE DURING  
THE EXPANSION OF A HOT DENSE PLASMA  
INTO A TENUOUS ONE**

On the basis of particle-in-cell simulations and qualitative analysis we show that formation of a plasma density bump, recently discovered in experiments on laser ablation of foils with femtosecond pulses, is due to the impact of a high-energy electron flux on the ion-acoustic wave packet formed at the front of a collisionless electrostatic shock that emerges during the expansion of a hot dense plasma into a rarefied ionized medium.

В недавних экспериментах [1, 2] по абляции алюминиевой фольги фемтосекундными лазерными импульсами было обнаружено формирование горба плотности на склоне профиля горячей лазерной плазмы, разлетающейся в окружающую холодную разреженную плазму. Данное явление не укладывается в рамки стандартной теории ионно-звуковых солитонов и для своего объяснения требует детального анализа кинетики ионов и электронов на фронте бесстолкновительной электростатической ударной волны. Такой анализ проведён нами с помощью 2D3V моделирования (методом частиц в ячейках) путём

численного решения уравнений Максвелла – Власова в типичных условиях неравновесной (горячей) лазерной плазмы. Установлено, что наличие разреженной (холодной) окружающей плазмы, в широкой области ее параметров, приводит к возникновению горба плотности частиц на фронте электростатической ударной волны, движущейся примерно с ионно-звуковой скоростью.

Структура этой волны и эволюция горба плотности во многом определяются потоком горячих неравновесных электронов и связаны со сложной динамикой частиц в фазовом пространстве, а также согласованной эволюцией электрического поля и генерируемых плазменных волн. После формирования квазистационарного горба распределение электронов вблизи фронта продолжает отличаться от максвелловского. Для формирования и поддержания горба существенны вклады нагоняющих его ускоренных ионов и захватываемых им ионов фоновой плазмы, причём относительный вклад первых постоянно растет со временем и довольно скоро начинает преобладать, так что ионы фона в основном остаются только в узкой передней части горба плотности.

В результате проведённых исследований выяснены типичные условия и место образования горба плотности, динамика изменения его скорости и плотности. Показано, что его толщина примерно на порядок больше плазменной длины волны и для него характерен примерно двукратный перепад плотности между максимумом и минимумом за фронтом ударной волны. Следует отметить, что ионы обеих фракций не захватываются в горб надолго, а либо обгоняют, либо отстают от него, иногда сделав одну-две осцилляции. В результате за фронтом образуются потоки ионов с разными скоростями, что приводит к увеличению ширины переходной области и количества осцилляций электрического поля в ней. Отношение энергии частиц в горбе к начальной энергии частиц слоя горячей плазмы при типичных начальных условиях составляет несколько процентов.

Работа А.А. Нечаева и А.В. Мишина поддержана грантом РФФИ (проект № 18-32-01065).

#### *Список литературы*

1. Гарасев М. А., Корытин А. И., Кочаровский В. В., Мальков Ю. А., Мурзанев А. А., Нечаев А. А., Степанов А. Н. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. С. 148.
2. A. N. Stepanov, M. A. Garasev, V. V. Kocharovsky et al. / Proc. of Int. Conf. Laser Optics 2018, St. Petersburg, Russia, June 4–8, 2018. IEEE, 2018. P. 242.

А.А. НЕЧАЕВ, М.А. ГАРАСЁВ, А.Н. СТЕПАНОВ,  
А.В. МИШИН, Вл.В. КОЧАРОВСКИЙ

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

## **ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗА ФРОНТОМ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ РАЗЛЕТЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ**

Численно исследован разлет неравновесной горячей и плотной плазмы в условиях, соответствующих недавним экспериментам по абляции фольги фемтосекундным лазерным импульсом. При помощи 2D3V PIC-моделирования проанализирован процесс генерации магнитного поля в плазмоиде, расширяющемся в разреженную плазму, испаренную из той же фольги лазерным предимпульсом. Показано, что анизотропия электронной температуры, нарастающая за фронтом образующейся при таком расширении ударной волны, на временах порядка 1000 обратных плазменных частот плотной плазмы приводит к развитию вейбелевской неустойчивости и росту квазистатических магнитных полей до уровня магнетизации порядка 0.02, что согласуется с экспериментальными результатами.

A.A. NECHAEV, M.A. GARASEV, A.N. STEPANOV,  
A.V. MISHIN, VI.V. KOCHAROVSKY

*Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod*

## **MAGNETIC FIELD GENERATION BEHIND THE FRONT OF A COLLISIONLESS SHOCK WAVE DURING THE EXPANSION OF A HOT DENSE PLASMA**

The expansion of a nonequilibrium hot dense plasma was investigated numerically for the set of parameters taken from recent experiments on laser ablation of a foil by a femtosecond pulse. Using 2D3V PIC-simulations we analyze how magnetic fields are generated in a plasmoid expanding through a cold and tenuous plasma, evaporated from the same foil by a laser precursor. Calculations show that at about 1000 inverse plasma frequencies of the dense plasma the electron temperature anisotropy that arises behind the shock wave, emerging during the expansion, leads to the Weibel instability and the growth of quasi-static magnetic fields up to a magnetization level of 0.02 in agreement with the experimental data.

В известных экспериментах по генерации сверхсильного магнитного поля в разлетающейся лазерной плазме, формируемой нано- и пикосекундными килоджоульными импульсами, не исследовались кинетические явления, связанные с немаксвелловским характером распределения электронов. Имеется всего одна экспериментальная работа по вейбелевской генерации филаментационного магнитного поля

потоком релятивистских электронов, созданным в разлетающейся лазерной плазме пондеромоторным действием фемтосекундного импульса на плотную часть плазмы [1].

С помощью 2D3V PIC-моделирования динамики плазмы в условиях недавно проведённого эксперимента [2] мы исследовали процессы нарастания и эволюции крупно- и мелкомасштабных магнитных полей при разлёте сильно неравновесной плотной плазмы в отсутствие дополнительных источников релятивистских электронов. Подобные явления для лазерной плазмы ожидаются в широкой области параметров, если абляция мишени осуществляется фемтосекундным импульсом и реализуется бесстолкновительный режим разлёта с характерным временем меньше или порядка наносекунды при энергиях лазерных импульсов  $\sim 1\text{--}100$  Дж.

Нагрев значительной доли электронов мощным излучением приводит к возникновению долговременного потока высокоэнергичных электронов из центральной части прогретой области. Появление магнитного поля обязано как этим токам (крупномасштабная компонента поля, время нарастания которой определяется характерным размером разогретой области  $\sim 0,1$  мм и составляет  $\sim 10$  пс), так и различным неустойчивостям МГД-типа (эффекты динамо и батареи Бирмана в плотной, столкновительной части плазмы, создающие среднемасштабную компоненту за время порядка десятков пс) и кинетического типа (прежде всего вейбелевская неустойчивость [3], генерирующая мелкомасштабную, предположительно наиболее сильную компоненту в разреженной, бесстолкновительной части плазмы начиная с характерных времен  $\sim 100$  пс).

Мы проанализировали возникающие анизотропные функции распределения электронов и ионов и обусловленные ими различные пространственные структуры магнитного поля. Результаты моделирования позволяют связать наблюдаемое в эксперименте [2] изменение поляризации диагностического излучения с фарадеевским вращением плоскости поляризации, происходящим в плазме с сильным неоднородным магнитным полем величиной порядка десятков тесла.

Работа А.А. Нечаева и А.В. Мишина поддержана грантом РФФИ (проект № 18-32-01065).

#### *Список литературы*

1. S. Zhou et al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. P. 255002.
2. A. N. Stepanov, M. A. Garasev, V. V. Kocharovskiy et al. / Proc. of Int. Conf. Laser Optics 2018, St. Petersburg, Russia, June 4–8, 2018. IEEE, 2018. P. 242.
3. C. Thaury, P. Mora, A. Heron et al. // Phys. Rev. E. 2010. V. 82. P. 016408.

<sup>1</sup>А.Т. СААКЯН,<sup>1</sup>А.А. КОЛОГРИВОВ,<sup>1</sup>Т.Т. КОНДРАТЕНКО,  
<sup>1</sup>В.Н. ПУЗЫРЁВ,<sup>1</sup>А.Н. СТАРОДУБ,  
<sup>1,2</sup>А.А. ФРОНЯ,<sup>1</sup>О.Ф. ЯКУШЕВ

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОЙ НА УСТАНОВКЕ «КАНАЛ-2»**

Проведены сравнительные измерения гидродинамической эффективности взаимодействия лазерного излучения с управляемой когерентностью с плазмой как на основной частоте (1.06 мкм), так и на частоте второй гармоники (0.53 мкм). В качестве мишеней использовались сплошные пластины из алюминия и меди. В этих же экспериментах были проведены исследования пространственного распределения рассеянного плазмой излучения.

<sup>1</sup>A.T. SAHAKYAN,<sup>1</sup>A.A. KOLOGRIVOV,<sup>1</sup>T.T. KONDRATENKO,  
<sup>1</sup>V.N. PUZYREV,<sup>1</sup>A.N. STARODUB,  
<sup>1,2</sup>A.A. FRONYA,<sup>1</sup>O.F. YAKUSHEV

<sup>1</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI

## **STUDY OF THE HYDRODYNAMIC EFFICIENCY OF LASER- PLASMA INTERACTION AND SPATIAL SCATTERING OF RADIATION BY PLASMA ON INSTALLATION «KANAL-2»**

Comparative measurements of the hydrodynamic efficiency of the interaction of laser radiation with controllable coherence with plasma at both the fundamental frequency (1.06 μm) and the second harmonic frequency (0.53 μm) were made. Solid aluminum and copper plates were used as targets. In these experiments the spatial distribution of the radiation scattered by the plasma was investigated.

Комплексные исследования гидродинамических явлений, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, имеют большую важность, поскольку основным параметром, определяющим стадию абляции, является гидродинамическая эффективность или отношение энергии испарённой части мишени к

полной энергии воздействующего лазерного излучения [1, 2]. Чем выше гидродинамическая эффективность лазерно-плазменного взаимодействия, тем больше затраченной энергии лазерного импульса перешло в энергию лазерной плазмы.

В проведённых на установке «Канал-2» [3] исследованиях было установлено, что в случае облучения плазмы излучением на частоте второй гармоники гидродинамическая эффективность взаимодействия оказывается выше и составляет примерно 10%. Показано также, что при облучении мишеней из более плотного вещества (меди) как на основной частоте, так и на частоте второй гармоники гидродинамическая эффективность взаимодействия выше, чем для менее плотного (алюминия). Установлено, что практически никакой зависимости гидродинамической эффективности взаимодействия от ширины спектра излучения нет.

Проведённые исследования пространственного распределения рассеянного плазмой излучения показали, что в экспериментах с медными мишенями на основной частоте рассеяние излучения в пространство происходит почти однородно, однако интенсивность рассеянного излучения в вертикальной плоскости почти в два раза больше, чем в горизонтальной, причём форма разлёта скорее похожа на струю в обратном направлении. В экспериментах на частоте второй гармоники форма разлёта практически сферическая, а само рассеяние уже неоднородно и в вертикальной плоскости более интенсивно и более близко к сфере, чем в горизонтальной плоскости.

Для осмысления и интерпретации полученных экспериментальных результатов были проведены теоретические расчёты по разлёту плазмы, согласно работе [4]. По расчётам в проведённых экспериментах должен происходить сферический разлёт плазмы с центром в фокусе лазерного излучения. Однако при сравнении с экспериментальными результатами получается, что для частоты второй гармоники такая картина и наблюдается, однако на основной частоте разлёт далёк от сферического.

*Список литературы*

1. Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Быковский Ю.А., Крохин О.Н. Лазерная плазма. Физика и применения.// Москва, МИФИ, 2003.
2. Афанасьев Ю.В., Басов Н.Г., Крохин О.Н. и др. Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой. Итоги науки и техники. Радиотехника. Том 17.// Москва, ВИНТИ, 1978.
3. Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V., Starodub A.N.// J. Russian Laser Research.2004. V. 25. P. 79.
4. Afanasiev Yu.V., Gamaly E.G., Guskov S.Yu., Demchenko N.N., Rozanov V.B. // Laser and Particle Beams. 1988.V. 6.Part 1, PP. 1-23.

В.П. САВИНОВ<sup>1</sup>, М.С. КРУГЛОВ<sup>2</sup>, В.А. РЯБЫЙ<sup>3</sup>,  
А.В. ЧЕРВЯКОВ<sup>1</sup>, В.Г. ЯКУНИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО РФ «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО РФ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ГРАНИЧНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ В ВЧ ЕМКОСТНОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Рассматривается взаимодействие плазмы ВЧ емкостного разряда (ВЧЕР) с его активными (электроды) и пассивными (стенки) граничными поверхностями. При взаимодействии плазмы с активными поверхностями возникает сложный комплекс процессов – генерация постоянных электрических полей, эмиссия электронов, формирование импульсных электронных пучков, возникновение различных неустойчивостей и др.

V.P. SAVINOV<sup>1</sup>, M.S. KRUGLOV<sup>2</sup>, V.A. RIABY<sup>3</sup>,  
A.V. CHERVJAKOV<sup>1</sup>, V.G. YAKUNIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*M.V. Lomonosov Moscow State University*

<sup>2</sup>*Pacific National University, Khabarovsk*

<sup>3</sup>*Moscow Aviation Institute (National research university), Moscow*

## **PLASMA INTERACTION WITH BOUNDARY SURFACES OF RADIOFREQUENCY CAPACITIVE LOW PRESSURE DISCHARGE**

The interaction of the RF capacitive discharge (RFCD) plasma with its active (electrodes) and passive (walls) boundary surfaces is considered. When plasma interacts with active surfaces, there is a complex set of physical processes – generation of DC electric fields, electron emission, formation of pulsed electron beams, excitation of various instabilities and others.

Рассматривается взаимодействие плазмы ВЧ емкостного разряда (ВЧЕР) низкого давления с его граничными поверхностями. Специфика граничных поверхностей в ВЧЕР заключается в том, что к одним поверхностям (газоразрядные электроды) извне прикладываются электрические потенциалы (активные поверхности), а к другим поверхностям (диэлектрические стенки разрядных трубок) ничего не подводится (пассивные поверхности). Особые условия на

диэлектрических стенках возникают в зоне действия «краевого эффекта» вблизи электродов. Важнейшей особенностью неравновесной плазмы ВЧЕР является зависимость ее характеристик от всех параметров разряда (рабочий газ, давление, ВЧ напряжение, частота поля, материал электродов и конфигурация разрядного промежутка). В результате контакта с плазмой пассивных поверхностей последние приобретают «плавающий» отрицательный потенциал относительно плазмы порядка нескольких эВ. Вследствие взаимодействия плазмы с активными поверхностями возникает сложный комплекс физических процессов и явлений. В приэлектродном слое пространственного заряда (ПСПЗ) происходит выпрямление ВЧ поля и возникает квазистационарная разность потенциалов порядка амплитуды приложенного ВЧ напряжения. В результате суперпозиции в каждый момент времени переменного поля от ВЧ генератора и квазистационарного поля ВЧ-детектирования в ПСПЗ формируются униполярные импульсы электрического напряжения. При повышенных ВЧ напряжениях значительно ускоренные в ПСПЗ положительные ионы вызывают интенсивную эмиссию электронов и распыление материала электродов. Авторами предложена оригинальная методика измерения плотности эмитированных электронов. Ускоренные в ПСПЗ эмитированные электроны формируют импульсные с частотой ВЧ поля электронные пучки. Интенсивное распыление материала электродов может использоваться как эффективно управляемый технологический процесс для очистки поверхностей, а также в качестве процесса активации поверхности перед нанесением тонких пленок. Представляет интерес взаимодействие плазмы ВЧЕР с поверхностями в присутствии пучково-плазменной неустойчивости, когда авторами зафиксировано повышение эффективной температуры электронов до значений  $\sim 10^6$  К и возникновение рентгеновского излучения. В литературе отмечалось обнаружение неустойчивых режимов ВЧЕР с образованием объемных кавитонов, генерирующих рентгеновское излучение и свободные нейтроны в реакциях ядерного синтеза в дейтерии. Наконец, взаимодействие плазмы с поверхностью (электрод ВЧЕР) может приводить к чисто радиотехническим эффектам – формированию паразитных продольных колебательных LC- контуров в разряде, возбуждение которых собственными электронными пучками наблюдали авторы в ВЧЕР.

С.В. САВУШКИНА<sup>1,2</sup>, Г.В.ПАНАСОВА<sup>1,2</sup>, Е.А. ВЫСОТИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ И КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ РАЗРУШЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ВЕРХНИМ СЛОЕМ ОКСИДА ГАФНИЯ**

Методом плазменного напыления в вакууме получены градиентные покрытия NiCoCrAlY-(NiCoCrAlY+7YSZ)-7YSZ-(7YSZ+9YSH)-9YSH. Проведено исследование структуры слоев покрытия, критической нагрузки разрушения, стойкости верхнего слоя покрытия при термическом анализе и теплоизолирующих свойств покрытия. Показано, что покрытие толщиной 150 мкм уменьшает тепловой поток, отводимый в систему охлаждения, до 0,34 от исходного.

S.V. SAVUSHKINA<sup>1,2</sup>, G.V. PANASOVA<sup>1,2</sup>, E.A.VYSOTINA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Keldysh Research Center, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University)

## **STUDY OF THERMAL RESISTANCE AND DESTRUCTION CRITICAL LOAD OF PLASMA GRADIENT COATINGS WITH TOP HAFNIA LAYER**

Gradient coatings NiCoCrAlY-(NiCoCrAlY + 7YSZ)-7YSZ-(7YSZ + 9YSH)-9YSH were obtained by low pressure plasma spraying. The structure of the coating layers, the destruction critical load, the resistance of the top coating layer during thermal analysis, and the heat insulating properties of the coating were studied. It was shown that the gradient coating with thickness of 150 μm reduced the heat flow to the cooling system to 0.34 from the initial one.

Оксид гафния является перспективным материалом верхнего слоя теплозащитного покрытия благодаря высокой химической, механической стабильности и его более высоким, чем у диоксида циркония, температурам фазовых переходов. Оксид гафния также обладает более низкой теплопроводностью, чем стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония, и демонстрирует более низкие скорости спекания. Однако, недостатком использования оксида гафния по сравнению с диоксидом циркония, остается меньший коэффициент теплового расширения.

Решением проблемы применения оксида гафния в качестве верхних слоев теплозащитного покрытия может быть создание градиентного

наноструктурного покрытия. Покрытия с плавным градиентом химического состава позволяют лучше демпфировать температурные сжатия и расширения покрытия при термоциклических нагрузках.

В данной работе на образцах БрХ1 получали градиентные покрытия толщиной до 150 мкм плазменным напылением порошков NiCoCrAlY, ZrO<sub>2</sub>-7%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7YSZ) и HfO<sub>2</sub>-9%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9YSH) на установке ВС-2 (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») при давлении в камере 100 Па с использованием эффектов течения Прандтля-Майера [1-2]. Для получения градиентного покрытия в корпус дозатора послойно насыпали напыляемые порошки и их смеси (1:1) в последовательности 9YSH, 7YSZ+9YSH, 7YSZ, 7YSZ+NiCoCrAlY, NiCoCrAlY.

Испытания методом скретч-тестирования проводили алмазным индентором при линейно возрастающей нагрузке от 1 до 200 Н при скорости нагружения 100 Н/мин. Критическая нагрузка разрушения покрытия толщиной 150 мкм составляет ~150 Н.

Синхронный термический анализ показал стабильность структуры слоя 9YSH в диапазоне температур от 30 до 1300° С и небольшой экзотермический процесс при температуре 1400° С, который может быть связан с укрупнением зерен наноструктурного покрытия.

Исследования теплоизолирующих свойств покрытий проводили с помощью плазмотрона (мощность дугового разряда ~10 кВт), работающего в условиях динамического вакуума. Перед запуском плазмотрона в систему охлаждения установки подавали воду (температура T<sub>1</sub>). Из установки вода вытекала по двум выходным каналам при температуре T<sub>2</sub>. Перед запуском плазмотрона T<sub>1</sub>=T<sub>2</sub>. Плазма натекала в вакуумную камеру с образованием висячего скачка уплотнения и отошедшей ударной волны перед металлической основой с покрытием. При этом охлаждающая вода нагревалась в установке от T<sub>1</sub> до T<sub>2</sub>. Для покрытия толщиной 150 мкм разница температур ΔT составила 28° С при расстоянии от плазмотрона 8 мм. Отношение теплового потока, прошедшего образец с покрытием и без покрытия в систему охлаждения, составило 0,34 от первоначального.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10309).

#### *Список литературы*

1. M. N. Polyanskiy, S. V. Savushkina, J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2014. Vol. 8, P. 144–148
2. S. V. Savushkina, M. N. Polyanskiy, G. V. Panasova // J. of Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech., 2018, Vol. 12, №5, P. 982–987

А.В. АГАФОНОВ<sup>1</sup>, Д.С. СТЕПАНОВ<sup>2</sup>, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ АНОДА НА ДИНАМИКУ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ИСТОЧНИКЕ ПЕННИНГА**

Рассмотрено влияние конфигурации анода, имеющего уступ со стороны катода, либо антикатода на динамику плазменных потоков в источнике ионов Пеннинга с термокатодом газонаполненной нейтронной трубки. Первоначальное распределение потенциала в источнике изменяется по мере развития разряда в соответствии с конфигурацией плазменных потоков, определяемой формой анода. Перемещение уступа вдоль продольной оси источника приводит к изменению ионного тока от 500 мкА до 700 мкА, а времени нарастания тока от 0.5 мкс до 2.0 мкс.

A.V. AGAFONOV<sup>1</sup>, D.S. STEPANOV<sup>2</sup>, E.Y. SHKOLNIKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*The Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia*

## **INVESTIGATION OF THE ANODE GEOMETRY IMPACT ON THE ION CURRENT PARAMETERS OF THE PENNING ION SOURCE WITH THERMAL CATHODE**

The influence of the anode configuration, which has a step on the cathode or anode side, on the plasma flows in a penning ion source with a thermal cathode of a gas-filled neutron tube is considered. The initial potential distribution in the source changes as the discharge develops in accordance with the configuration of the plasma flows determined by the anode configuration. Moving the step along longitudinal axis, the ion current varies in range from 500 мкА to 700 мкА, and the rise time - from 0.5 мкс to 2.0 мкс.

Современные технологии нейтронного нефтегазового каротажа требуют специфических характеристик нейтронного генератора на газонаполненной нейтронной трубке (ГНТ). Среди них можно выделить малую длительность переднего фронта нейтронного импульса (менее 1 мкс) при нейтронном потоке  $1.5 \cdot 10^8$  н/с (400 мкА ионного тока при скважности 5). Традиционные ГНТ с источником ионов пеннинговского типа [1], способны генерировать нейтронные потоки с фронтами в несколько микросекунд. Ниже описываются результаты поиска конфигураций анодного блока ГНТ, обеспечивающих заданные параметры.

Поиск осуществлялся численным моделированием с помощью кода KARAT [2]. На рис. 1 представлены 2.5D модели ионного источника

Пеннинга ГНТ с различными конфигурациями анода. Рабочий газ – молекулярный дейтерий при давлении 1 мТорр. Здесь же указаны напряжения на электродах. Задано распределение магнитного поля катушки с током. В левом торце источника находится термокатод.

При обычной форме анода (без уступов) извлечение ионов из источника происходит из областей  $> 0,55$  см, которая смещается влево для левого уступа и вправо для правого. Однако, при развитии разряда ( $t > 2,0$  мкс), электронный поток изменяет распределение потенциала во втором случае так, что его средняя энергия уменьшается до  $10^2$  эВ, а сечение ионизации существенно возрастает. Это обстоятельство, а также наличие горячего катода приводит к сокращению переднего фронта нейтрального импульса.



Рис. 1. Модели ионного источника Пеннинга в KARAT.

Для обобщения результатов приведем зависимость ионного тока от положения уступа на аноде в различные моменты времени (рис. 2).

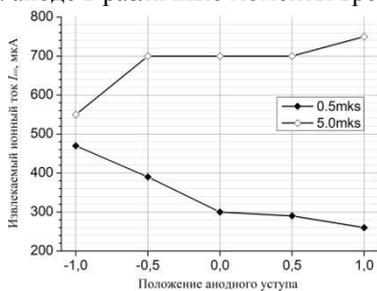


Рис. 2. Зависимость извлекаемого тока от положения анодного выступа

#### Список литературы

1. Битулев А.А., Курдюмов И.Г., Чуринов С.В. и др. Новые разработки нейтронных генераторов во ВНИИА для исследования нефтегазовых и рудных месторождений. Сб. докладов межд. научно-тех. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». М, 2013, С. 68 – 71.
2. Tarakanov V.P. «User's Manual for Code KARAT», BRA Inc., Va, USA, (1992).

Е.В. СТЕПИН

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МГД-ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ С ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Представлены результаты исследований МГД-течений в коаксиальных каналах плазменных ускорителей, полученные с помощью численного решения соответствующих математических задач. Изучено влияние геометрии электродов, формирующих канал ускорителя, и внешнего продольного магнитного поля на характеристики трансзвуковых сверхальфвеновских течений с ускорением.

E. V. STEPIN

*Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## **NUMERICAL STUDIES OF MHD FLOWS IN PLASMA ACCELERATOR CHANNELS WITH LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD**

The researches' results of MHD flows in coaxial plasma accelerators' channels obtained by numerical solutions of the corresponding mathematical problems are presented. The influence of electrodes' geometry forming an accelerator channel and of an external longitudinal magnetic field on the characteristics of transonic super-Alfvénic flows with acceleration is studied.

Исследования и разработки плазменных ускорителей представляют собой интерес благодаря широкому спектру их применения для решения актуальных и перспективных технологических задач. Рекордные тяговые, скоростные и энергетические характеристики были впервые получены на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе (КСПУ). Принцип работы устройств данного типа основан на ускорении плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях за счет возникающей при этом силы Ампера.

Математическое моделирование и численные исследования плазменных ускорителей играют важную роль в понимании происходящих в них процессов. Данный подход позволяет проанализировать качественные и количественные закономерности в

характере и свойствах этих процессов без необходимости проведения серий дорогостоящих экспериментов.

В настоящем докладе представлены результаты расчетов магнитогазодинамических (МГД) течений плазмы в коаксиальных профилированных каналах ускорителей типа КСПУ в присутствии продольного магнитного поля, индуцированного внешними по отношению к установке проводниками электрического тока. Основное внимание направлено на исследование влияния геометрии электродов, формирующих канал ускорителя, и продольного магнитного поля на параметры ускорительных трансзвуковых сверхальфвеновских течений.

Проведенные расчеты представлены двумя сериями, отличающимися друг от друга геометрией электродов ускорителя. В первой серии расчетов центральный электрод является выпуклым в сторону канала, а внешний имеет форму прямого цилиндра. Во второй серии расчетов, наоборот, профилированным является внешний электрод, а центральный – прямой цилиндрический.

Продемонстрировано, что в каналах первого варианта геометрии наиболее эффективное ускорение плазмы происходит вблизи центрального профилированного электрода. В случае обратной геометрии в центральной части канала вблизи профилированного внешнего электрода возникает зона компрессии потока с соответствующим ростом плотности и температуры, и ускорительные характеристики канала падают.

В расчетах с продольным магнитным полем показано, что в обоих вариантах конфигурации канала оно отжимает плазму к внешнему электроду, вызывает вращение потока вокруг оси симметрии и отклоняет линии электрического тока против часовой стрелки, препятствуя тем самым негативному для ускорения влиянию эффекта Холла. При этом ускорительные характеристики канала в целом незначительно снижаются по всему пространству ускорителя.

Представленные в докладе результаты опубликованы в работах [1-3].

#### *Список литературы*

1. Брушлинский К.В., Жданова Н.С., Стёпин Е.В. // ЖВМ и МФ. 2018. Т. 58. № 4. С. 607-617.
2. Brushlinskii K.V., Styopin E.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 937. 012007.
3. Brushlinskii K.V., Styopin E.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 788. 012009.

А.А. ФРОНЯ<sup>1,2</sup>, Н.Г. БОРИСЕНКО<sup>1</sup>, В.Н. ПУЗЫРЕВ<sup>1</sup>,  
А.Т. СААКЯН<sup>1</sup>, А.Н. СТАРОДУБ<sup>1</sup>, О.Ф. ЯКУШЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,  
Россия

## ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ПЛАЗМЕ ТАЦ МИШЕНЕЙ

В работе представлены результаты экспериментов по изучению генерации второй гармоники в плазме мишеней из триацетата целлюлозы. Мишени облучались излучением неодимового лазера на стекле на основной частоте наносекундной длительности. Плотность мощности излучения на мишени составляла  $10^{12}$ - $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Получены данные по временной развертке генерируемой в плазме второй гармоники, ее угловой и пространственной локализации.

A.A. FRONYA<sup>1,2</sup>, N.G.BORISENKO<sup>1</sup>, V.N. PUZYREV<sup>1</sup>,  
A.T. SAHAKYAN<sup>1</sup>, A.N.STARODUB<sup>1</sup>, O.F.YAKUSHEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

## PECULIARITIES OF SECOND HARMONIC GENERATION IN THE PLASMA OF TAC

The results of experiments on the study of the generation of the second harmonic in the plasma of TAC targets are presented in report. The targets were irradiated with a neodymium glass laser at the fundamental frequency of a nanosecond duration. The radiation power density at the target was  $10^{12}$ - $10^{13}$  W / cm<sup>2</sup>. The data on the time scan of the second harmonic generated in plasma, its angular and spatial localization, are obtained.

Малоплотные материалы представляют собой перспективный материал по таким направлениям исследований как: использование пены для эффективного сглаживания неоднородностей интенсивности лазерного пучка, задачи гидродинамики многослойных пенных мишеней, использование пены в экспериментах по изучению уравнения состояния вещества, астрофизические исследования, исследования по ЛТС [1, 2, 3].

В настоящее время используют различные виды малоплотных мишеней, отличающиеся по материалу, итоговой плотности мишени,

структуре, многослойные структуры, с добавками частиц металлов и без, и др. [4].

В представленной работе эксперименты проводились с микроструктурированными мишенями из триацетата целлюлозы. Получены экспериментальные данные по рассеянному излучению в лазерной плазме для мишеней с плотностью 2, 50, 1300 мг/см<sup>3</sup>. В экспериментах было задействовано несколько диагностических каналов, позволяющих получить данные по временной развертке второй гармоники (рис.1), ее угловой и пространственной локализации.

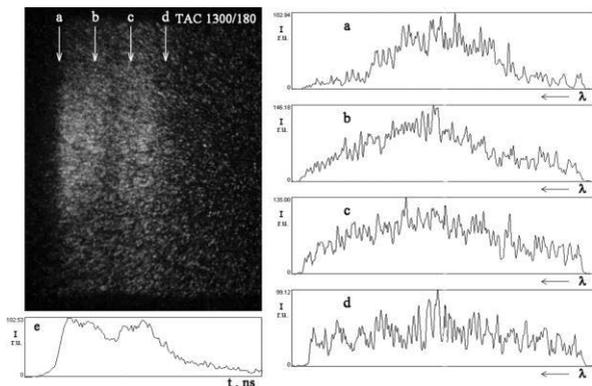


Рис. 1. Временная развертка генерируемой в плазме второй гармоники.  
Мишень ТАЦ, плотность 1300 мг/см<sup>3</sup>, толщина 180 мкм.  
Энергия лазерного излучения 29 Дж.

#### Список литературы

1. Hall T., Batani D., Nazarov W., et al. // Laser and Particle Beams 2002. 20. 303.
2. Dezulian R., Canova F., Barbanotti S., et al. // Physical review E 2006. 73. 047401.
3. Borisenko N. G., Akimova I. V., Gromov A. I., et al. // Fusion Science and Technology. 2006. 49:4, 676A.S.
4. Orekhov A.S., Akunets A.A., Borisenko L.A., et al. // Journal of Physics: Conference Series 8th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2013). 2016. 012080.

А.В. КАЗИЕВ<sup>1</sup>, А.В. ТУМАРКИН<sup>1</sup>, Д.В. КОЛОДКО<sup>1,2</sup>,  
М.М. ХАРЬКОВ<sup>1</sup>, К.А. ЛЕОНОВА<sup>1</sup>, Д.Г. АГЕЙЧЕНКОВ<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
<sup>2</sup>ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

## **ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА С ГОРЯЧИМ КАТОДОМ**

Измерены интегральные электрические характеристики импульсного магнетронного разряда с горячим катодом с мишенями из Cr, Cu и Si. Построены фазовые траектории развития разряда в координатах «напряжение–ток». На основании полученных результатов определены режимы устойчивого существования импульсного разряда с горячей мишенью без перехода в дуговую форму при длительности импульса не менее 20 мс.

A. V. KAZIEV<sup>1</sup>, A. V. TUMARKIN<sup>1</sup>, D. V. KOLODKO<sup>1,2</sup>,  
M. M. KHARKOV<sup>1</sup>, K. A. LEONOVA<sup>1</sup>, D. G. AGEYCHENKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino Branch, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia*

## **CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF A HOT- CATHODE IMPULSE MAGNETRON DISCHARGE**

The integral electrical characteristics of a hot-cathode magnetron discharge with Cr, Cu, and Si targets have been measured. The phase trajectories in voltage vs. current coordinates have been obtained. The results allowed us to determine the stable operation regimes of a hot-target impulse magnetron discharge with pulse duration of 20 ms and more.

Проводилось экспериментальное определение интегральных электрических характеристик импульсного магнетронного разряда с горячим катодом. В качестве мишеней применялись Cr, Cu и Si. Измерения проводились в зависимости от величины магнитного поля на поверхности мишени и от мощности источника питания. Построены фазовые траектории разряда в координатах «напряжение–ток», позволившие проанализировать его развитие. Определены режимы устойчивого горения разряда.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант 18-79-10242).

А.В. КАЗИЕВ, М.А. КОНДРАТЬЕВ, А.В. ТУМАРКИН,  
К.А. ЛЕОНОВА, М.М. ХАРЬКОВ, Т.В. СТЕПАНОВА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА ПРИ РЕАКТИВНОМ РАСПЫЛЕНИИ АЛЮМИНИЯ**

Исследовались характеристики высокопоточного импульсного магнетронного разряда (СИМП) в процессе реактивного распыления Al в среде Ar/O<sub>2</sub>. Измерены зависимости скорости напыления от содержания кислорода в смеси для различных режимов питания разряда. Получены значения удельной скорости напыления для различных соотношений длительности разрядных импульсов и пауз между ними.

A.V. KAZIEV, M.A. KONDRATYEV, A.V. TUMARKIN,  
K.A. LEONOVA, M.M. KHARKOV, T.V. STEPANOVA

*<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **CHARACTERISTICS OF A HIGH-CURRENT IMPULSE MAGNETRON DISCHARGE DURING THE REACTIVE SPUTTERING OF ALUMINUM**

The characteristics of a high-current impulse magnetron discharge have been studied during the reactive sputter deposition of Al in Ar/O<sub>2</sub> gas mixture. The dependence of deposition rate on oxygen content in the gas mixture has been measured for different power management regimes. The specific deposition rate values have been obtained for different ratios of on/off times.

Разработка технологий импульсного магнетронного распыления для осаждения прозрачных оптических покрытий является чрезвычайно актуальной задачей. В настоящей работе изучались параметры высокопоточного импульсного магнетронного разряда (СИМП) при реактивном распылении мишени Al в среде Ar/O<sub>2</sub>. Содержание кислорода в смеси варьировалось в диапазоне 0–8%. Измерялись электрические параметры разряда (ток, напряжение в импульсе) и скорость осаждения покрытия в зависимости от доли кислорода. Скорость осаждения определялась кварцевым микробалансом с контрольной калибровкой толщины по измерениям профилометром. Получены зависимости удельной скорости осаждения от коэффициента заполнения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-38-20185).

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.Н. ВОЙТЮК, С.С. ДОВГАНЮК,  
А.С. КАПЛЕВСКИЙ, Н.Н. КАСИМОВА, Г.П. ТИМКОВСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ВОЛЬФРАМ-АЛЮМИНИЕВЫЕ СЛОИ. ЗАХВАТ ВОДОРОДА, МОДИФИКАЦИЯ И ОБЕЗГАЖИВАНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ**

В работе изучается захват водорода при осаждении вольфрам/алюминиевых слоёв на вольфрам, их модификация и обезгаживание в процессе нагрева. Показано, что в вольфрам-алюминиевых слоях в процессе напыления аккумулируется водород вплоть до соотношения  $H : (W+Al) = 2.4$ , а его десорбция происходит при температуре 1400-1550К. Показано, что почти такое же количество водорода вновь захватывается при охлаждении и выделяется примерно при тех же температурах.

L.B. BEGRAMBEKOV, A.N. VOITYUK, S.S. DOVGANYUK,  
A.S. KAPLEVSKY, N.N. KASIMOVA, G.P. TIMKOVSKIY  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **ALUMINUM-TUNGSTEN LAYERS. HYDROGEN TRAPPING, MODIFICATION AND OUTGASSING DURING HEATING**

Hydrogen isotopes trapping during aluminum-tungsten layers deposition on tungsten, modification of deposited layers and its outgassing during heating were studied. It was shown that a large amount of hydrogen atoms accumulate in aluminum-tungsten layers during deposition down to the ratio  $H : (W+Al) = 2.4$ , hydrogen desorbs from the layers under high temperature 1400-1550K. It was shown that almost the same amount of hydrogen atoms trap during cooling and desorb at the same temperatures.

Первая стенка и дивертор ИТЭР изготавливаются из бериллия и вольфрама, соответственно. Осаждаясь на контактирующие с плазмой поверхности, расплывённые атомы будут формировать перенапыленные вольфрам-бериллиевые слои. Алюминий по своим химическим и физическим свойствам схож с бериллием [1]. Подобны также закономерности захвата водорода во время напыления плёнок алюминия и бериллия на вольфрам и их обезгаживания [2]. Вместе с тем алюминий не токсичен, поэтому в работе изучается захват водорода при осаждении вольфрам/алюминиевых слоёв на вольфрам, их модификация и десорбция из них водорода в процессе нагрева.

На вольфрамовые образцы в плазме  $\text{Ar} + 10 \text{ ат. \% H}_2$  ( $P = 1.5 \times 10^{-3} \text{ Торр}$ ,  $P_{\text{ост}} = 5 \times 10^{-6} \text{ Торр}$ ,  $T_{\text{образцов}} = 200\text{-}250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) осаждались W/Al слои толщиной 200 нм следующих составов: «20 ат. % W + 80 ат. % Al», «45 ат. % W + 55 ат. % Al» и «95 ат. % W + 5 ат. % Al». Методами растровой электронной микроскопии и энерго-дисперсионной спектроскопии исследовались изменение структуры и состава W/Al слоёв при нагреве. Десорбция газа из W/Al слоёв измерялась методом термодесорбционной спектроскопии.

Обнаружено, что во время напыления W/Al слои из остаточного газа захватывают водород, соответственно, до соотношения  $\text{H} : (\text{W} + \text{Al}) = 2.4$ ; 1.2 и 1.3 для W/Al слоев состава «20 ат. % W + 80 ат. % Al», «45 ат. % W + 55 ат. % Al» и «97 ат. % W + 3 ат. % Al», что означает захват примерно 0.12 гр. трития в  $1 \text{ м}^2$  перенапылённых W/Al слоёв в токамаке.

Водород десорбировался из W/Al слоёв при 1300-1400К. (Заметим, водород десорбируется из вольфрама при 800-850К и при 700К из алюминия). Почти те же количества водорода вновь захватывались при охлаждении и выделялись примерно при тех же температурах при пяти повторных циклах.

При нагреве до 1200К структура поверхности слоёв не менялась, но в них появлялся кислород. При температурах более 1200К адгезия слоёв к подложке уменьшалась, появлялись поры, начиналось испарение алюминия. В области температур десорбции водорода (1300-1400 К) во всех слоях содержание алюминия уменьшалось до 25 ат. %. Примерное отношение числа атомов W/Al/H/O составляло 18 : 6 : 10 : 1. Это, по-видимому, отражает большую роль вольфрама в удержании водорода.

Полученные результаты позволяют предположить, что при совместном напылении атомов вольфрама и алюминия образовывались сплавы W/Al с различным содержанием компонент. При температуре в области 1300-1400 К концентрация компонентов соответствовала составу сплава  $\text{Al}_2\text{W}$ . При температуре 1600 К в покрытии оставался только вольфрам. Таким образом, приходится признать, что большие количества водорода, обнаруживаемые при повторных нагревах образцов, захватывались в оставшийся после удаления алюминия вольфрамовый слой при его остывании.

#### *Список литературы*

1. L. Marot, C. Linsmeier, B. Eren et al. // Fus. Engineer. and Des. 2013. Vol. 88 P. 1718-1721.
2. L. Begrambekov, A. Kaplevsky, A. Evsin et al. // XXIII International conference Ion-Surface Interactions: the book of abstracts: Moscow, 2017, P. 176-179.

В.П. ТАРАКАНОВ<sup>1,2</sup>, Е.Г. ШУСТИН<sup>3</sup>

*<sup>1</sup>Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

*<sup>3</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл., Россия*

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ С ПЛАЗМОЙ, СОЗДАВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

В данном докладе дан обзор работ, в которых методом компьютерного моделирования исследованы особенности пристеночной плазмы и процессов в ней при взаимодействии плазмы со структурами типа «проводник на диэлектрике». Данная постановка задачи инициирована опытами по формированию методом плазменного травления таких структур, как нанополоски (nanoribbons) графена, топологических изоляторов и т.п. В этих опытах плазма создавалась либо электронным пучком малой плотности (ЕВЕР - установка LAPPS), либо пучково-плазменным разрядом. Моделирование проводилось с помощью кода KARAT.

Код KARAT - это универсальный релятивистский, полностью электромагнитный 1D, 2D и 3D код, основанный на методе PIC, для решения нестационарных электродинамических задач, имеющих сложную геометрию. Конечно-разностная схема на прямоугольной сетке используется для решения уравнений Максвелла. Он используется для моделирования таких устройств, как ЛСЭ, гиротроны, ЛОВ, для моделирования взаимодействия лазерного излучения с плазмой, явлений в лабораторной и космической плазме.

В данном цикле мы исследовали действие ионных потоков из плазмы на поверхность микропровода - плоского проводника с шириной, меньшей длины Дебая плазмы, лежащего на изоляторе. Задача формулировалась в 1D и 2D моделях. Предварительно изучены структура и распределения плотностей заряженных частиц у стенки в случае, когда источник плазмы (электронный пучок) удален от стенки. Показано, что в этом случае энергетические распределения электронов и профили плотности заряженных частиц радикально отличаются от результатов классической теории (слой Чайлда-Ленгмюра). Далее изучено воздействие ионов на микропровод при различных приложенных к нему потенциалах, как статических так и периодических. Показано, что электростатическая линза, создаваемая разностью между потенциалом проводника и

индуцированным на соседней поверхности диэлектрика, препятствует равномерному травлению проводника по его ширине. Была найдена форма импульсов, при которой форма распределения скорости травления по ширине микропровода приближается к однородной.

**Секция**

**УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции

– к.ф.-м.н., доцент Полозов Сергей  
Маркович

Секретарь секции

– к.т.н., доцент Гусарова Мария  
Александровна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8226

E-mail: SMPolozov@mephi.ru, MAGusarova@mephi.ru

АШАНИН И.А.<sup>1,2</sup>, БАРАБИН С.В.<sup>1,3</sup>, БЛАГОВ А.Е.<sup>1</sup>,  
БАШМАКОВ Ю.А.<sup>1,2,4</sup>, БОЛЬШАКОВ А.Е.<sup>1,3</sup>, ГОГИН А.А.<sup>1</sup>,  
ГУСАРОВА М.А.<sup>1,2</sup>, ДАНИЛОВА Д.К.<sup>1,2</sup>, ДМИТРИЕВА В.В.<sup>1,2</sup>,  
ДЮБКОВ В.С.<sup>1,2</sup>, ЗИЯТДИНОВА А.В.<sup>1,3</sup>, КЛЮЧЕВСКАЯ Ю.Д.<sup>1,2</sup>,  
КОРЧУГАНОВ В.Н.<sup>1</sup>, КУЙБИДА Р.П.<sup>1,3</sup>, КУЛЕВОЙ Т.В.<sup>1,2,3</sup>,  
ЛАЛАЯН М.В.<sup>1,2</sup>, ЛОЗЕЕВ Ю.Ю.<sup>1,2</sup>, ЛОЗЕЕВА Т.А.<sup>1,2</sup>, ЛЯКИН  
Д.А.<sup>1,3</sup>, МАХОРО А.А.<sup>1,2</sup>, МАЦИЕВСКИЙ С.В.<sup>1,2</sup>, МЕХАНИКОВА  
В.Ю.<sup>1,2</sup>, МОСОЛОВА О.А.<sup>1,2</sup>, ОРЛОВ А.Ю.<sup>1,3</sup>, ПАНИШЕВ А.С.<sup>2</sup>,  
ПОЛОЗОВ С.М.<sup>1,2</sup>, ПОНОМАРЕНКО А.А.<sup>1,2</sup>, ПОРВАТКИНА  
О.В.<sup>1,2</sup>, ПРОНИКОВ А.И.<sup>1,2</sup>, РАЩИКОВ В.И.<sup>1,2</sup>, САВЧЕНКО А.А.<sup>1,2</sup>,  
САРАТОВСКИХ М.С.<sup>1,3</sup>, СЕНИН Р.А.<sup>1</sup>, СИТНИКОВ А.Л.<sup>1,3</sup>,  
СМЫГАЧЕВА А.С.<sup>1</sup>, ТИЩЕНКО А.А.<sup>1,2</sup>, ФЕЩЕНКО А.М.<sup>1,2</sup>,  
ФОМИН Е.А.<sup>1</sup>, ХАБИБУЛЛИНА Е.Р.<sup>1,3</sup>, ШАТОХИН В.Л.<sup>1,2</sup>,  
BIASCI J.-C.<sup>5</sup>, JACOB J.<sup>5</sup>, LIUZZO S.<sup>5</sup>, RAIMONDI P.<sup>5</sup>, REVOL J.-  
L.<sup>5</sup>, WHITE S.<sup>5</sup>, CHAVANNE J.<sup>5</sup>, MACCARRONE C.<sup>5</sup>, LE VEC G.<sup>5</sup>,  
SCHEIDT K.-B.<sup>5</sup>, CHAIZE J.M.<sup>5</sup>, PEDROSO-MARQUES H.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - Институт теоретической и экспериментальной физики

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

<sup>5</sup>European Synchrotron Radiation Facility

## **ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО РАЗРАБОТКЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РОССИЙСКОГО СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 4ГО ПОКОЛЕНИЯ ИССИ-4**

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» начата разработка источника синхротронного излучения 4го ИССИ-4. Проект поддержан Министерством образования и науки Российской Федерации. В докладе будут представлены основные результаты работ, по ИССИ-4, в частности – общая компоновка ускорительного комплекса, результаты исследования динамики пучка в основном накопителе и линейном ускорителе-инжекторе, результаты разработки вакуумной системы, системы инжекции пучка, систем диагностики и управления, ВЧ резонаторов основного накопителя и т.д.

ASHANIN I.A.<sup>1,2</sup>, BARABIN S.V.<sup>1,3</sup>, BLAGOV A.E.<sup>1</sup>,  
BASHMAKOV YU.A.<sup>1,2,4</sup>, BOLSHAKOV A.E.<sup>1,3</sup>, GOGIN A.A.<sup>1</sup>,  
GUSAROVA M.A.<sup>1,2</sup>, DANILOVA D.K.<sup>1,2</sup>, DMITRIYEVA V.V.<sup>1,2</sup>,  
DYUBKOV V.S.<sup>1,2</sup>, KHABIBULLINA E.R.<sup>1,3</sup>, KLUCHEVSKAIA  
YU.D.<sup>1,2</sup>, KORCHUGANOV V.N.<sup>1</sup>, KUIBIDA R.P.<sup>1,3</sup>, KULEVOY  
T.V.<sup>1,2,3</sup>, LALAYAN M.V.<sup>1,2</sup>, LOZEEV YU.YU.<sup>1,2</sup>, LOZEEVA T.A.<sup>1,2</sup>,  
LIAKIN D.A.<sup>1,3</sup>, MAKHORO A.A.<sup>1,2</sup>, MEKHANIKOVA V.YU.<sup>2</sup>,  
MATSYEVSKIY S.V.<sup>1,2</sup>, MOSOLOVA O.A.<sup>1,2</sup>, ORLOV A.YU.<sup>1,3</sup>,  
PANISHEV A.S.<sup>2</sup>, POLOZOV S.M.<sup>1,2</sup>, PONOMARENKO A.A.<sup>1,2</sup>,  
PORVATKINA O.V.<sup>1,2</sup>, PRONIKOV A.I.<sup>1,2</sup>, PASHCHIKOV V.I.<sup>1,2</sup>,  
SARATOVSKIY M.S.<sup>1,3</sup>, SAVCHENKO A.A.<sup>1,2</sup>, SENIN R.A.<sup>1</sup>,  
SITNIKOV A.L.<sup>1,3</sup>, SMYGACHEVA A.S.<sup>1</sup>, TISHCHENKO A.A.<sup>1,2</sup>,  
FESHCHENKO A.M.<sup>1,2</sup>, FOMIN E.A.<sup>1</sup>, ZIYATDINOVA A.V.<sup>1,3</sup>,  
SHATOKHIN V.L.<sup>1,2</sup>, BIASCI J.-C.<sup>5</sup>, JACOB J.<sup>5</sup>, LIUZZO S.<sup>5</sup>,  
RAIMONDI P.<sup>5</sup>, REVOL J.-L.<sup>5</sup>, WHITE S.<sup>5</sup>, CHAVANNE J.<sup>5</sup>,  
MACCARRONE C.<sup>5</sup>, LE BEC G.<sup>5</sup>, SCHEIDT K.B.<sup>5</sup>, CHAIZE J.M.<sup>5</sup>,  
PEDROSO-MARQUES H.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute»

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI

<sup>3</sup>National Research Center «Kurchatov Institute» - ITEP

4P.N. Lebedev Physical Institute of RAS

5European Synchrotron Radiation Facility

## **RUSSIAN 4TH GENERATION SPECIALIZED SYNCHROTRON RADIATION SOURCE SSRS-4 CONCEPT AT NRC “KURCHATOV INSTITUTE”: CURRENT RESULTS OF THE ACCELERATOR COMPLEX DEVELOPMENT**

The conceptual development of 4th generation Specialized Synchrotron Radiation Source SSRS-4 is under development today at NRC “Kurchatov Institute”. This Project is supported by Ministry of Science and Higher Education under Agreements No 14.616.21.0086 and No 14.616.21.0088 from 24/11/2017. Main results of the SSRS-4 accelerator complex development will be presented in the report as well as the general SSRS-4 concept, beam dynamics simulation results both for injection linac and main ring, results of the vacuum system, injection system, control and diagnostics systems and RF cavities conceptual development.

В.С. ДЮБКОВ<sup>1,2</sup>, С.М. ПОЛОЗОВ<sup>1,2</sup>, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ<sup>1,2</sup>,  
Т.А. ЛОЗЕЕВА<sup>1,2</sup>, В.Ю. МЕХАНИКОВА<sup>1,2</sup>, С.М. ЛИУЦЦО<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва, Россия  
<sup>3</sup>European Synchrotron Radiation Facility, Гренобль, Франция

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ В ОСНОВНОМ НАКОПИТЕЛЬНОМ СИНХРОТРОНЕ НА ЭНЕРГИЮ 6 ГЭВ ПРОЕКТА ИССИ-4**

Рассмотрены варианты магнитной структуры специализированного источника синхротронного излучения четвертого поколения, рассчитанного на энергию электронов 6 ГэВ, обеспечивающие значение равновесного горизонтального эмиттанса пучков в диапазоне (50...100) пм. Выполнен расчёт движения электронов в основном накопительном синхротроне ИССИ-4. Определены основные параметры магнитной структуры синхротрона на 6 ГэВ обеспечивающие замкнутость равновесной орбиты электронов и приемлемое значение динамической апертуры синхротрона.

V.S. DYUBKOV<sup>1,2</sup>, S.M. POLOZOV<sup>1,2</sup>, Y.Y. LOZEEV<sup>1,2</sup>, T.A.  
LOZEEVA<sup>1,2</sup>, V.Y. MEKHANIKOVA<sup>1,2</sup>, S.M. LIUZZO<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia  
<sup>2</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia  
<sup>3</sup>European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, France

## **PRELIMINARY RESULTS OF MAGNETIC STRUCTURE AND ELECTRON DYNAMICS CALCULATION FOR 6 GEV MAIN RING FOR SSRS-4 PROJECT**

Variants of magnetic structure of the fourth generation Specialized synchrotron radiation source SSRS-4, on 6 GeV electron energy, providing the (50...100) pm horizontal emittance, are considered. The calculation of electron dynamics in the main SSRS-4 synchrotron is carried out. The main parameters of 6 GeV synchrotron magnetic structure ensuring stable equilibrium electron orbit and the acceptable value of the synchrotron dynamic aperture are determined.

Источники синхротронного излучения (СИ) 3-го и 4-го поколения, а также рентгеновские лазеры на свободных электронах находят всё более широкое применение в материаловедении, молекулярной биологии и биохимии, кристаллографии, спектроскопии, исследовании быстро

протекающих процессов, медицине и других научных и прикладных задачах. Ключевым вопросом в данном случае является достижение дифракционного предела при данной энергии пучка, так как в этом случае исследование объектов, имеющих размер, сравнимый с длиной волны синхротронного или ондуляторного излучения, возможно с высокой четкостью и контрастностью.

В НИЦ «Курчатовский институт» ведутся работы по разработке российского специализированного источника синхротронного излучения четвертого поколения (ИССИ-4). Проект ИССИ-4 должен стать прорывным и обеспечить конкурентные характеристики ускоряемых электронных сгустков, позволяющие пользователям СИ проводить передовые исследования. Главными требованиями к основному накопительному синхротрону ИССИ-4 является обеспечение равновесного значения горизонтального эмиттанса циркулирующих в нём электронных пучков менее 100 пм при энергии 6 ГэВ и максимальном накопленном токе в кольце не менее 200 мА. Для удовлетворения данным требованиям в настоящей работе рассмотрены варианты магнитной структуры накопительного синхротрона на основе разработанной для Европейского центра синхротронного излучения (ESRF, Франция) магнитной структуры с семью гибридными ахроматическими поворотами (7 Bend Achromat, см. рис. 1, где  $s$  и  $x$  – орбитальная горизонтальная координаты). В результате произведённых расчетов определено, что для достижения равновесного значения горизонтального эмиттанса электронного пучка в интервале значений (50...100) пм число суперпериодов магнитной структуры длиной 26,3743 м должно быть не менее 40. Основными параметрами при настройке магнитных полей в элементах структуры являлись значения оптических функций в начале, центре и на конце суперпериода, значение динамической апертуры синхротрона, определяющее время жизни электронов в нём. Для обеспечения достаточного значения продольного аксептанса накопителя выполнена оптимизация эффективной амплитуды ускоряющего напряжения компенсирующих потери энергии на СИ резонаторов. Показано, что при найденных в работе параметрах элементов структуры накопителя равновесное значение горизонтального эмиттанса электронного пучка менее 70 пм, а суммарные потери энергии электронами на СИ за один оборот порядка 2 МэВ.



Рис. 1. 7ВА магнитная структура накопительного синхротрона

С.В. БАРАБИН, Д.А. ЛЯКИН, Т.В.КУЛЕВОЙ, А.Ю. ОРЛОВ,  
М.С. САРАТОВСКИХ

*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва,  
Россия*

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ – ИССИ-4**

Специализированный источник синхротронного излучения четвертого поколения (ИССИ-4) - это новая радиационная установка, основанная как на синхротронном, так и на ЛСЭ излучении. Проект направлен на создание принципиально нового специализированного источника рентгеновского излучения - специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения (ИССИ-4) с чрезвычайно высокой пространственной когерентностью, соответствующей лазерному излучению, рекордно высокой яркостью и временной структурой. Представлено актуальное состояние исследования параметров и организации и системы контроля и диагностики пучка для ИССИ-4.

S.V. BARABIN, D.A. LIAKIN, T.V. KULEVOY, A.Y. ORLOV, M.S.  
SARATOVSKIKH

*National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

## **CONTROL AND DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR THE FOURTH- GENERATION RUSSIAN SYNCHROTRON RADIATION SOURCE**

The fourth-generation Specialized Synchrotron Radiation Source (SSRS-4) is the new radiation facility based on both synchrotron and FEL radiation. The project aims to create a fundamentally new specialized X-ray source – a specialized synchrotron radiation source of the 4th generation (SSRS-4) with extremely high spatial coherence corresponding to that of laser radiation, a record high brightness and temporal structure. The actual status of study of parameters and organization of the beam diagnostics and the supervision control system for SSRS-4 is presented.

Основными частями синхротрона ИССИ-4, в зависимости от выбранной схемы, являются линейный ускоритель средней или полной энергии, компактный или полноразмерный бустер, основное кольцо синхротрона и каналы вывода синхротронного излучения. Система управления и диагностики должна: управлять ВЧ полями в линейном ускорителе, бустере и синхротроне; управлять магнитами и корректорами; диагностировать параметры пучка; управлять таймерной системой, а также инженерными и другими вспомогательными системами

ускорителя, такими как вакуумная система, система охлаждения и термостатирования, системой контроля доступа и радиометрического контроля.

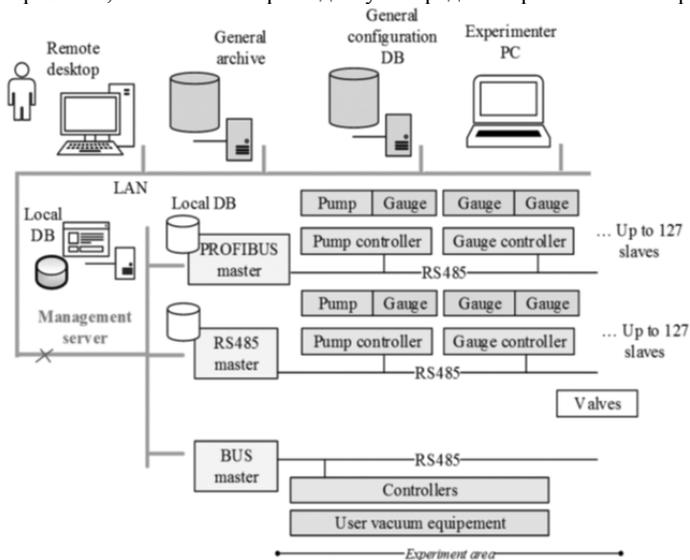


Рис. 1. Архитектура системы управления ускорителя ИССИ-4, на примере вакуумной системы.

Система управления ускорителя ИССИ-4 будет иметь иерархическую многоуровневую архитектуру (Рис.1). Шина данных высокого уровня системы управления имеет тип Ethernet с выбранным протоколом передачи данных. На высокоуровневой шине Ethernet данные должны передаваться между следующими основными узлами системы управления: набором терминалов оператора, таких как конфигурация системы управления, управление подсистемой, управление и сбор данных экспериментатором; общая конфигурация и общие архивные базы данных с набором серверов событий; серверы подсистем.

Архитектура систем управления отдельными подсистемами ИССИ-4 может быть как одноуровневой, так и многоуровневой. Системы управления отдельными подсистемами ИССИ-4 обычно физически связаны с высокоуровневой шиной данных Ethernet ускорителя, но могут быть логически разделены, имея в этом случае локальную конфигурацию и архивные базы данных. Этот выбор сделан путем изменения параметров конфигурации системы управления ИССИ-4.

В качестве программного инструмента для разработки системы управления рассматриваются система управления TANGO и разработка системы на базе интегрированных пакетов разработки, соответствующих методологии быстрой разработки программного обеспечения и на базе библиотеки ZeroMQ.

Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, С.М ПОЛОЗОВ  
Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ДЛЯ НАЧАЛЬНЫХ СЕКЦИЙ С ПОКФ УСКОРИТЕЛЕЙ LINAC-100 И LINAC-30 ДЛЯ MEGA-SCIENCE ПРОЕКТА DERICA**

Новый mega-science проект фабрики тяжелых ионов DERICA в 2017г. предложен в Объединенном Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ, г. Дубна). Проект ускорительного комплекса DERICA предполагает разработку двух линейных ускорителей тяжелых ионов: сверхпроводящий непрерывный ускоритель-драйвер пучка тяжелых ионов LINAC-100 и нормально проводящий импульсный пост-ускоритель вторичных радиоактивных изотопов LINAC-30 [1]. Для обоих ускорителей начальными секциями являются нормально проводящие ускоряющие структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. В работе представлены результаты моделирования динамики частиц для этих структур с двумя вариантами рабочих частот 162,5 МГц и 81,25 МГц.

Y.Y. LOZEEV, S.M POLOZOV  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **BEAM DYNAMICS SIMULATION FOR INITIAL SECTIONS OF LINAC-100 AND LINAC-30 ACCELERATORS FOR MEGA- SCIENCE DERICA PROJECT**

A new mega-science heavy ion factory project DERICA in 2017 at Joint Institute for Nuclear Research (JINR, Dubna). Accelerator facility project implies the development of two heavy ion linear accelerators: superconducting CW heavy ion driver-accelerator LINAC-100 and normal conducting pulsed secondary radioactive isotope post-accelerator LINAC-30. Initial sections for both accelerators are normal conducting accelerating structures with radio frequency quadrupole. In this paper beam dynamics simulation results for these structures are presented for two operating frequencies - 162,5 MHz and 81,25 MHz.

Разработка и создание исследовательского комплекса DERICA в ОИЯИ предполагает создание двух линейных ускорителей LINAC-100 и LINAC-30, предназначенных для ускорения тяжелых ионов в широком диапазоне соотношения массы ионов к заряду  $A/Z$ . В качестве начальной

части в таких ускорителях традиционной используется нормально проводящая ускоряющая секция с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой.

В работе представлены результаты численного моделирования динамики частиц для начальных секций с ПОКФ ускорителей LINAC-100 и LINAC-30. Исследование динамики пучка проводилось при помощи программы BEAMDULAC-RFQ [2]. Расчеты проводились без учета объемного заряда пучка. Для LINAC-100, работающего в непрерывном режиме, важнейшими критериями при выборе структуры являются минимальное количество потерянных частиц, ограничение максимальной напряженности поля, а также как можно больший запас по величине акцептанса по отношению к эмиттансу. Основным типом ионов, ускорение которых предполагается в LINAC-100, будут являться ионы урана  $U^{34+}$ . В то же время для LINAC-30, работающего в импульсном режиме, предъявляются меньшие требования к величине напряженности поля, однако, для него также важно минимизировать потери частиц (радиоактивных изотопов), иначе внутренние поверхности ускорителя будут активироваться, а некоторые полученные изотопы будут иметь такую низкую интенсивность, что важным будет сохранение каждого иона. По результатам исследования динамики были предложены оптимальные параметры каналов с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для двух вариантов рабочих частот 162,5 МГц и 81,25 МГц, а также проведено их сравнение для каждого из ускорителей.

*Список литературы:*

- [1] S L.V. Grigorenko, A.S. Fomichev, V.S. Duybkov et al. Design of LINAC-100 and LINAC-30 for new rare isotope facility project DERICA at JINR // Proceedings of 61<sup>st</sup> ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams HB2018, Daejeon, Korea. P. 220-225.
- [2] Polozov S.M. Ion beam space charge neutralization using for beam intensity increase in linacs. Problems of Atomic Science and Technology, 3 (79), pp. 131-136 (2012).

Т.А. ЛОЗЕЕВА<sup>1</sup>, С.М. ПОЛОЗОВ<sup>1</sup>, А.В. САМОШИН<sup>1</sup>, Л.В.  
ГРИГОРЕНКО<sup>1,2</sup>, А.С. ФОМИЧЕВ<sup>2</sup>, В. БАРТ<sup>1,3,4</sup>, С. Г. ЯРАМЫШЕВ<sup>1,3,4</sup>  
<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва,  
Россия

<sup>2</sup>Объединенный Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия

<sup>3</sup>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, Германия

<sup>4</sup>Helmholtz Institute Mainz, Mainz, Германия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ УСКОРИТЕЛЕ-ДРАЙВЕРЕ LINAC- 100 ДЛЯ ПРОЕКТА DERICA**

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций Объединенного Института Ядерных Исследований (г. Дубна, Россия) начата разработка ускорителя-драйвера LINAC-100 для фабрики радиоактивных изотопов DERICA. Ускоритель предназначен для получения пучков тяжелых ионов, вплоть до урана, с конечной энергией 100 МэВ/н. LINAC-100 должен работать в непрерывном режиме, что делает необходимым использование сверхпроводящих резонаторов в его основной части. Также в ходе обсуждения было предложено включить в конструкцию две стрипперных секции для повышения эффективности ускорения. В докладе представлены результаты моделирования динамики пучка  $U^{34+}$  в модульной сверхпроводящей части ускорителя LINAC-100, а также проведено сравнение концепций ускорителя для различных энергий установки стрипперных секций.

T.A. LOZEEVA<sup>1</sup>, S.M. POLOZOV<sup>1,2</sup>, A.V. SAMOSHIN<sup>1</sup>,  
L.V. GRIGORENKO<sup>1,2</sup>, A.S. FOMICHEV<sup>2</sup>, W. BARTH<sup>1,3,4</sup>,  
S.G. YARAMYSHEV<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

<sup>3</sup>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

<sup>4</sup>Helmholtz Institute Mainz, Mainz, Germany

## **BEAM DYNAMICS SIMULATION FOR THE ACCELERATOR- DRIVER LINAC-100 FOR DERICA PROJECT**

Recently Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (FLNR) at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR, Dubna) in collaboration with NRNU «MEPhI» started the development of superconducting driver-accelerator LINAC-100 for rare isotope facility–DERICA. Accelerator is proposed to deliver heavy ion beams of different kinds (up to  $U^{238}$ ) with output energy of 100 AMeV. CW operation of LINAC-100 justifies the necessity of using superconducting cavities in its modular part. It was also suggested to

include two gas strippers into accelerator construction to increase its efficiency. In the following report the results of  $U^{34+}$  beam dynamics simulation in modular SC part of LINAC-100 are presented, along with the comparison of LINAC-100 concepts for different stripping energies.

Основное назначение LINAC-100 – ускорение интенсивных непрерывных первичных пучков стабильных ионов (от бора до урана) с током пучка на уровне  $>10 \mu F$  для производства радиоактивных изотопов (РИ) методом фрагментации. На начальном этапе планировалось ускорять пучки урана с соотношением  $A/Z$ , то есть  $U^{40+}$  [1], однако в настоящее время на ECR источниках невозможно получить пучки 40-зарядного урана высокой интенсивности, поэтому в процессе работы было принято решение перейти на ионы  $U^{34+}$  и  $A/Z$ . Также было предложено установить два газовых стриппера на промежуточных энергиях для повышения эффективности ускорителя и сокращения его общей длины.

Традиционно сверхпроводящие (СП) ускорители строят по модульному принципу – ускоритель разбивают на группы СП резонаторов с одинаковым значением геометрической фазовой скорости, работающих на одинаковой частоте. Такие резонаторы, как правило, являются независимо фазирруемыми, что обеспечивает большую гибкость установки. В данной работе исследуется динамика пучка урана в ускорителе, состоящем из пяти групп четырех-зазорных независимо-фазирруемых резонаторов, в качестве фокусирующих элементов используются сверхпроводящие соленоиды. Исследовано несколько вариантов ускорителя для различных комбинаций положения стрипперов, также рассмотрен вариант ускорителя без стрипперных секций для дополнительного обоснования их применения. Проведено сравнение полученных результатов, из нескольких вариантов ускорителя выбран подходящий вариант, обеспечивающий трансмиссию пучка 100% и обладающий минимальной длиной и, соответственно, минимальным числом резонаторов для обеспечения экономической целесообразности комплекса.

*Список литературы:*

- [1] L.V. Grigorenko, A.S. Fomichev, V.S. Duybkov et al. Design of LINAC-100 and LINAC-30 for new rare isotope facility project DERICA at JINR // Proceedings of 61<sup>st</sup> ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams HB2018, Daejeon, Korea. P. 220-225.

Н. В. АВРЕЛИН  
*ТРИУМФ, Ванкувер, Канада*

## **ЗАЩИТА И КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ВЧ-СИСТЕМЫ ДЛЯ ЦИКЛОТРОНА 520 МЭВ**

ВЧ система 520 МэВ циклотрона в ТРИУМФ имеет систему оповещения и защиту от электрических пробоев, протечки воды и других отклонений от рабочих режимов в ВЧ усилителях, передающих коаксиальных линий и ускоряющих резонаторах циклотрона. Система оповещения и защиты не только обеспечивает информацией, но и осуществляет защиту ВЧ систему путем ее выключения и автоматического старта. Система оповещения о неисправностях записывает информацию о возникших проблемах в лог файл, для случаев высокого уровня отражений в элементах ВЧ тракта ВЧ усилителя система также записывает осциллограммы напряжения на дуантах, ВЧ сигнала в передающей коаксиальной линии, огибающую отраженного от резонатора ВЧ сигнала и огибающей сигнала задающего генератора. Система защиты и контроля находится в постоянном развитии. В настоящее время внедряются система анализа стоячей волны в согласующей части коаксиальной передающей линии. В представленном докладе описываются общее описание системы защиты и контроля, а также последние шаги по ее улучшению.

N. V. AVRELINE  
*TRIUMF, Vancouver, Canada*

## **PROTECTION AND MONITORING OF THE RF SYSTEM FOR TRIUMF'S 520 MEV CYCLOTRON**

The RF System of 520 MeV Cyclotron in TRIUMF has monitoring, protection from sparks, water leaks, and the other failures in the amplifiers, the transmission line (TL) and cyclotron's resonator. This monitoring not only allows registering events in the RF System, but also determining where the problem took place and turns ON interlocks of the RF System, if the RF System is unable to recover itself. The monitoring system records these events in the log file and saves multichannel oscilloscope's images showing the change of voltage and power in different parts of the RF System after an event. The protection and monitoring systems are in the state of constant improvement. This paper presents the general description of the monitoring and protection system and discusses its latest steps for improvement.

ВЧ система 520 МэВ циклотрона в ТРИУМФ состоит из двух ВЧ систем для обеспечения основного резонатора циклотрона и вспомогательного резонатора (бустера). Основная ВЧ система включает 1

МВт ВЧ усилитель на основе восьми тетродов типа 4CW250,000В с тремя сумматорами ВЧ мощности (Рис.1), передающую коаксиальную линию, составленную из 50 Ом коаксиальной линии и 30 Ом коаксиальной линии с согласующими емкостями, и ускоряющего резонатора [1].

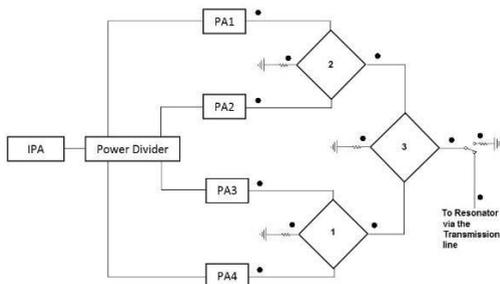


Рис. 1. МВт ВЧ усилитель 520-МэВ циклотрона

ВЧ система имеет защиту от рассогласования. Черными точками на рис. 1 обозначены 12 точек контроля рассогласований в ВЧ системе. В случае срабатывания защиты ВЧ система выключается. Система контроля ВЧ системы так же обеспечивает защиту, в случае падения напряжения на дуантах она перезапускает ВЧ систему или ее выключает, в случае если не удаётся обеспечить ее рабочий режим. Все внештатные события записываются в лог файл. В случае пробоев в резонаторе и в передающей линии осциллограммы сигналов напряжения на дуантах, уровня ВЧ мощности в передающей линии, уровня отражения от резонатора, уровень сигнала задающего генератора записываются на компьютер, имеющий удаленный доступ.

#### *Список литературы*

- [1] N.V. Avreline, V.L. Zvyagintsev, I.V. Bylinskii, C. Bartlett, B. Jakovljevic, T. Au, 520 MeV TRIUMF Cyclotron RF System: Maintenance, Tuning and Protection, RuPAC 2016, Saint Petersburg, Russia

В.В.ПАРАМОНОВ<sup>1</sup>, А.П. ДУРКИН

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН», Москва, Россия

## **СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР НА ВЫСОКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЕ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ**

Анализируются ожидаемые характеристики ускоряющих структур для ускорения протонов на участке (2 – 25) МэВ на рабочих частотах 476 МГц или 952 МГц. Рассматриваются традиционная структура Альвареца, структура на H- волне Interdigital H (IH) и структура с сосредоточенными параметрами Split-Ring. Приводятся расчетные величины шунтового сопротивления Rsh, добротности Q и коэффициента перенапряжения. Оцениваются достижимые величины темпа ускорения, требуемой ВЧ мощности и времени заполнения резонаторов. Для ускорения протонов с высокой скважностью импульсов тока ярко выражено преимущество структур с рабочим колебанием вида  $\pi$  и высоким отношением Rsh/Q. Обсуждаются некоторые аспекты динамики частиц предполагая дальнейшее ускорение в структуре S частотного диапазона.

V.V.PARAMONOV<sup>1</sup>, A.P. DURKIN

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia

## **COMPARISON OF ACCEL RATING STRUCTURES WITH HIGH OPERATING FREQUENCY FOR LOW ENERGY PROTONS ACCELERATION**

The expected parameters of accelerating structures, operating at frequencies 496 MHz or 952 MHz for protons acceleration in the energy range (2-25) MeV are analyzed. The traditional drift tube Alvarez structure, Interdigital H structure and the structure with clearly lumped fields distributions – Split Ring are considered. The calculated values of shunt impedance Rsh, quality factor Q and overvoltage coefficient are presented. Attainable values of the accelerating rate, the required RF power and the cavity filling time are estimated. To accelerate protons with a low duty circle of current pulses, there is a pronounced advantage of  $\pi$  – type structures and a high Rsh/Q ratio. Some aspects of particle dynamics are discussed, assuming further acceleration in the structure with S band frequency range.

В реальном соотношении размеров рассматриваемые структуры показаны на Рис. 1, где а) – структура Альвареца на колебании  $E_{01}$ , б) IH и в) Split-Ring

структуры. Структуры рассматриваются для ускорения протонов в диапазоне энергий (2 – 25) МэВ и режиме с высокой скважностью импульсов тока пуска. При сравнении ВЧ характеристик структур на частотах 476 МГц и 952 МГц предполагается одинаковый радиус апертуры  $a=3,5$  мм и одинаковый внешний радиус трубок дрейфа. В обоих случаях наивысшее величину  $R_{sh}$ , до 300 МОм/м при 476 МГц, обеспечивает структура ИН. В рассматриваемых условиях ни по одному из показателей – возможному темпу ускорения, требуемой ВЧ мощности и необходимой длительности ВЧ импульса, структура Альвареца преимуществ не имеет. Структура Split-Ring позволяет наиболее просто осуществить разбтение на короткие резонаторы, разместив фокусирующие элементы вне резонатора.

Предполагая дальнейшее ускорение в структуре S частотного диапазона, выбор частоты 952 МГц обеспечивает более комфортные условия согласования продольного движения частиц, существенно меньшую длительность ВЧ импульса и меньшую, в единицах критерия Килпатрика, напряженность электрического поля на поверхности. Выбор частоты 476 МГц обеспечивает существенно меньшую величину требуемой ВЧ мощности и более реалистичен с позиции выбора возможных источников ВЧ питания.

Полученные результаты необходимы для более детальных оценок динамики частиц, учитывая возможные параметры инжектора, определения фрагментации структуры и разработки обоснованно рекомендуемой схемы ускорителя протонов на энергию нескольких сотен МэВ.

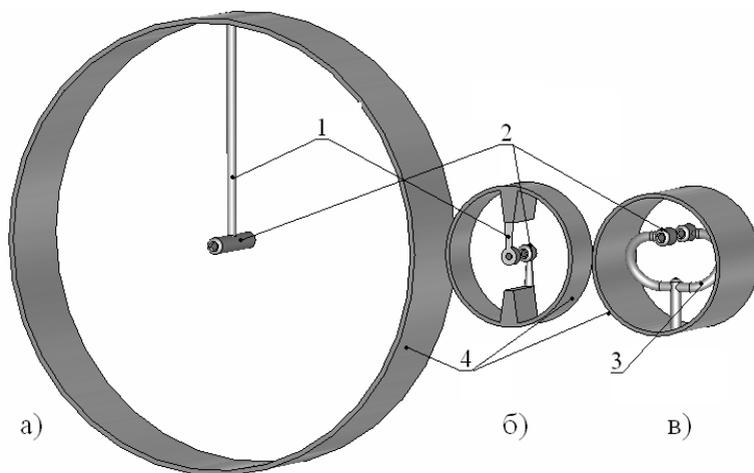


Рисунок 1. Рассматриваемые структуры, а) - с трубками дрейфа, б) – ИН, в) – Split-Ring. 1 – штанги для крепления трубок дрейфа, 2 – трубки дрейфа, 3 – вибратор, 4 – внешняя обечайка.

М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН, С.В. МАЦИЕВСКИЙ,  
Р.Е. НЕМЧЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ВВОДА МОЩНОСТИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТОВ ПОЛУВОЛНОВЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ**

Разработана конструкция устройства ввода мощности в полуволновый сверхпроводящий резонатор для проведения тестовых измерений. Оптимизирована геометрия элементов конструкции с целью обеспечения минимального отражения СВЧ мощности от устройства без значительного его усложнения. Проведены механические расчёты, на их основе выдвинуты требования к устройству ввода движения в вакуум для обеспечения требуемого диапазона настройки погружения антенны.

M.A. GUSAROVA, M.V. LALAYAN, S.V. MATSIEVSKIY  
*National Research Nuclear University «MEPhI»*

## **DEVELOPMENT OF POWER INPUT DEVICES FOR HALF- WAVE SUPERCONDUCTING RESONATOR VERTICAL TESTS**

Half-wave superconducting resonator vertical test power coupler design was carried out. The geometry of the structural elements was optimized in order to ensure minimal reflection of the RF power from the device avoiding its significant complication. Mechanical calculations were carried out, on the basis of which requirements were put forward for a vacuum movement input device in order to ensure the required range of the antenna immersion adjustment.

При введении в эксплуатацию сверхпроводящих резонаторов, в частности полуволновых, важным этапом является измерение зависимости собственной добротности резонатора от ускоряющего градиента. Эти тесты обычно проводятся с использованием криостатов погружного типа с выводом подводящих трубок и проводов через крышку, что не позволяет использовать рабочий ввод мощности, рассчитанный на подключение через боковую крышку криостата. Эта проблема, а также дополнительное требование возможности перестройки коэффициента связи в широком диапазоне, вынуждают разрабатывать

специальное устройство ввода мощности, предназначенное для использования в тестовых измерениях.

В процессе эксплуатации тестовый ввод мощности будет настроен на критическую связь с тестируемым резонатором, в связи с чем проходящая СВЧ мощность будет сравнима по величине с потерями в сверхпроводящей ячейке. Это делает возможным использование промышленных разъёмов и подводящих линий.

Разработанный ввод мощности устроен следующим образом: вакуумноплотный разъём N-типа при помощи скользящего контакта соединён с полной антенной; антенна удерживается на месте при помощи керамических поддерживающих полуколец; механическое движение антенны обеспечивается при помощи сальфона сварного типа.

Данное устройство было оптимизировано для достижения минимального отражения СВЧ мощности. Были проведены механические расчёты движения антенны при приложении силы к фланцу сальфона. Было установлено, что требуемое усилие может быть обеспечено шаговыми моторами, представленными на рынке.

После разработки устройства ввода движения в вакуум и инкорпорирования его в общую конструкцию, планируется изготовление и применение устройства при проведении тестовых измерений полуволновых ячеек HWR для проекта NICA.

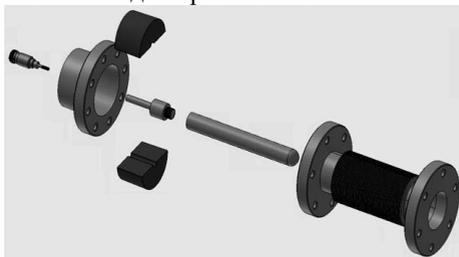


Рис.1. Конструктивные элементы тестового устройства ввода мощности

#### *Список литературы*

- [1] M.V. Lalayan, T.A. Bakhareva, M. Gusarova, and S.V. Matsievskiy, "Input Power Coupler for NICA Injector Coaxial Quarter Wave SC Cavity", in Proc. 18th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF'17), Lanzhou, China, July 2017, paper MOPB008, pp. 61-63, ISBN: 978-3-95450-191-5, <https://doi.org/10.18429/JACoW-SRF2017-MOPB008>, 2018.
- [2] S.V. Matsievskiy, M. Gusarova, and M.V. Lalayan, "Input Power Coupler for NICA Injector Coaxial Half Wave SC Cavity", in Proc. RUPAC'18, Protvino, Russia, Oct 2018, pp. 375-377. doi:10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEPSB48

О.И. ДРИВОТИН, Д.А.СТАРИКОВ  
*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ УСКОРИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ПОКФ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВТОРОГО ПОРЯДКА**

Задача оптимизации ускорительной структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) рассматривается как задача оптимального управления ансамблем динамических систем, описываемым некоторой плотностью распределения в фазовом пространстве. В качестве критерия оптимальности рассматривается функционал, зависящий от конечной плотности, а в качестве управляющих функций - эффективность ускорения и синхронная фаза. Для численного решения предлагается использовать метод, основанный на представлении второй вариации функционала в виде интегрального выражения, содержащего функции Грина для вариаций траекторий динамической системы и некоторый тензор третьего ранга.

O.I. DRIVOTIN, D.A. STARIKOV  
*St.Petersburg State University, Russia*

## **MATHEMATICAL MODEL OF RFQ STRUCTURE OPTIMIZATION BASED ON A SECOND ORDER METHOD**

Optimization problem of the RFQ accelerator structure is considered as the problem of the optimal control of an ensemble of dynamical systems described by a phase space distribution density. A functional depending on the final density is considered as the cost functional, and the acceleration efficiency and the synchronous phase are considered as the controls. For numerical solution of the problem, it is proposed to use a method based on representation for the second variation of the cost functional as an integral expression containing the Green function for variation of trajectories of the dynamical systems and a tensor of the third rank.

При проектировании ускорительных структур с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) обычно используется известный алгоритм [1], в соответствии с которым синхронная фаза вдоль ускорительного канала меняется плавно.

В работах Д.А. Овсянникова и его последователей [2-4] были разработаны методы оптимизации ускорительных структур, в которых задача оптимизации рассматривалась как задача управления ансамблем динамических систем, характеризуемым плотностью распределения в

фазовом пространстве. Поскольку в рамках этих методов вычисляются первые производные функционала качества по параметрам управления, они представляют собой методы первого порядка. Эти методы были применены для оптимизации структуры с ПОКФ [5]. Как оказалось, отклонение от плавного закона изменения синхронной фазы может улучшать структуру. Основную проблему при использовании методов первого порядка представляет большой объем вычислений.

Одним из способов уменьшения объема вычислений является применение методов второго порядка. В работе [4] был предложен метод, использующий матричные импульсы [6], которые находятся как решения соответствующих краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. Число таких задач квадратично по числу параметров управления, то есть может быть довольно велико.

В настоящей работе предлагается альтернативный метод второго порядка, в котором вторые производные функционала качества по параметрам управления выражаются в виде некоторых интегралов на основе интегрального представления для второй вариации траектории управляемой динамической системы, полученного в работе [7]. При этом число численно решаемых краевых задач зависит только от размерности фазового пространства, то есть может быть существенно меньше, чем для матричных импульсов. Представленная в работе модель, позволяет применить этот подход в случае, когда в качестве управлений рассматриваются эффективность ускорения и синхронная фаза. Возможность применения такого метода для случая, когда в качестве управления рассматривается только эффективность ускорения, была уже продемонстрирована ранее [8].

#### *Список литературы*

- [1] Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. Динамика частиц. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
- [2] Овсянников Д.А. Математические методы управления пучками. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1980. 228 с.
- [3] Овсянников Д.А., Дривотин О.И. Моделирование интенсивных пучков заряженных частиц.
- [4] СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2003. 176 с.
- [5] Бублик Б.Н., Гарашенко Ф.Г., Кириченко Н.Ф. Структурно-параметрическая оптимизация и устойчивость динамики пучков. Киев: Наукова Думка, 1985. 304 с.
- [6] Drivotin O.I., Ovsyannikov D.A., Svistunov Yu.A., Vorogushin M.F. // Proc. EPAC'97. Stockholm, 1997. Pp. 1227-1229.
- [7] Габасов Р., Кириллова Ф.М. Особые оптимальные управления. М.: Наука, 1973. 256 с.
- [8] 7. Drivotin O.I. // Cybernetics and Physics. Vol.7, No. 4. Pp. 188-194.
- [9] Drivotin O.I., Starikov D.A. // Proc. RuPAC2016. St.Petersburg, Russia, 2016. Pp.240-243.

С.Н.АНДРИАНОВ, Н.С.ЕДАМЕНКО

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ ЧАСТИЦ**

При разработке систем управления распределенными пучками частиц особое внимание уделяется проблемам допусков на параметры системы управления. Действительно, как в процессе моделирования, так и в процессе эксплуатации возникают задачи «наблюдения» за реализуемыми значениями параметров управляемой системы. В статье рассматриваются методы параметрической идентификации, основанные на современных информационных технологиях. В качестве объектов исследования рассматриваются системы управления пучком частиц.

S.N. ANDRIANOV, N.S. EDAMENKO

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

## **COMPUTER PARAMETRIC IDENTIFICATION OF CONTROL SYSTEMS OF PARTICLE BEAMS**

In proceeding of designing distributed particle beam control systems, special attention is paid to problems of tolerances on control system parameters. Indeed, both in the process of modeling and in the process of operation, the tasks of «observing» the realizable values of parameters of the controlled system arise. The paper discusses the methods of parametric identification, based on modern information technologies. As objects of research, particle beam control systems are considered.

При конструировании систем управления пучками частиц особое внимание необходимо уделять задачам определения (идентификации) возможных отклонений функциональных параметров, характеризующих наблюдаемое состояние исследуемой системы управления, которые обеспечивают необходимую устойчивость системы при допустимых отклонениях критериев качества от их оптимальных значений. С общей точки зрения задача идентификации является одной из подзадач теории оптимального управления динамическими системами. Следует заметить, что методы, развиваемые для задач идентификации, имеют также широкое применение и при поиске соответствующих оптимальных решений. Следует отметить, что в процессе исследований необходимо предусматривать возможность использования различных математических

методов, алгоритмов, а также программной реализации алгоритмов и необходимых вычислительных процессов.

Заметим, что соответствующую процедуру идентификации рассматриваемых параметров можно разбить на следующие этапы: классификация объекта, выбор модели («достаточной» для рассматриваемой задачи), разработка иерархической системы классификаторов идентификации и разработка алгоритмов идентификации (обеспечивающих сходимость, оптимальность, многокритериальность и др. свойства рассматриваемых систем). Задачи идентификации динамических систем можно разделить на два класса. Первый класс основан на идентификации систем с известной структурой (задачи параметрической идентификации) и второй класс на методах идентификации систем с неизвестной структурой. В этом случае соответствующая задача идентификации может быть сформулирована как задача аппроксимации неизвестной функциональной связи входа  $Y$  с выходом  $\Psi$ . Выбор системы используемых базисных функций можно задать как исходя из физических критериев, так и из математических (например, для получения достоверных оценок качества аппроксимации). Заметим, что подобный подход весьма эффективен при решении задач идентификации как реального распределения управляющего поля, так и его характеристик вдоль электрической оси соответствующих структурных элементов (например, диполя, квадруполь и т.д.). Следует отметить, что при увеличении размерности числа параметров вычислительные процедуры становятся чрезвычайно ресурсоемкими, что приводит к необходимости использования эффективных численных методов. В данной работе в качестве базового метода рассматривается модифицированный метод скользящего допуска [1]. Применение этого метода позволяет не только реализовывать эффективные вычислительные эксперименты, но и получать дополнительную информацию о характере «поведения» искомого решения, например, не только проводить исследование процесса сходимости метода, но и получать данные по характеру влияния управляющих параметров на критерий оптимальности.

#### *Список литературы*

- [1] Андрианов С.Н. Динамическое моделирование систем управления пучками частиц. СПбГУ. СПб, 2005. С. 366.

КАРИМОВ А.Р.<sup>1,2</sup>, БУЛЫГИН А.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

## **ОХЛАЖДЕНИЕ ИОННЫХ ПУЧКОВ В СКРЕЩЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

В рамках гидродинамического описания рассматривается охлаждение ионных пучков, находящихся в скрещенных магнитных полях, за счет передачи импульса между макроскопическими степенями свободы пучка. Производится сравнение данного подхода с другими методами охлаждения пучков заряженных частиц. Определены начальные параметры пучков и магнитной системы, при которых происходит затухание радиальной компоненты скорости пучка.

KARIMOV A.R.<sup>1,2</sup>, BULYGIN A.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of Electrophysical Facilities, National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoye shosse 31, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Izhor'skaya 13/19, Moscow, Russia*

## **COOLING ION BEAMS IN CROSSED MAGNETIC FIELDS**

Based on the hydrodynamic description, the cooling of ion beams being in crossed magnetic fields is studied. It is assumed that such effect of cooling is caused by momentum transfer between the macroscopic degrees of freedom for a beam. We have compared the present method with other ones in order to find the use domain of the present approach. The relations between the beam parameters and the magnetic system providing the cooling effect are found.

При движении пучка ионов наблюдается рост, занимаемого им фазового объема вследствие многократного рассеяния на остаточном газе, влияния пространственного заряда и тепловой расходимости. Эти процессы, препятствующие формированию пучков большой фазовой плотности, могут быть скомпенсированы за счет так называемого процесса охлаждения пучков, когда одновременное уменьшение продольной и поперечной составляющих эмиттанса пучка приводит к уменьшению его фазового объема, а значит и к увеличению фазовой плотности.

Основными методами охлаждения пучка ионов на данный момент являются электронное и стохастическое охлаждение. Обладая рядом преимуществ, данные методы не лишены недостатков, обусловленных физической сутью процессов, лежащих в их основе. Так, при электронном охлаждении наблюдается сильное уменьшение числа тяжёлых ионов вследствие рекомбинации [1]. При стохастическом охлаждении есть эффект тепловых шумов системы, возникающий из-за обратных связей между внешними электродами и ионами пучка [1].

В настоящей работе в рамках гидродинамического описания обсуждается возможность уменьшения поперечной составляющей эммитанса пучка, распространяющегося в скрещенных магнитных полях (используется постоянное радиальное поле и нестационарное аксиальное поле), за счет аномального переноса, ведущего к передаче импульса из радиальной в продольную степень свободы пучка. Вследствие этого процесса происходит затухание радиального движения в пучке и уменьшается поперечный размер пучка. В работе приведены оценки параметров пучка и магнитной системы, при которых может происходить затухание радиальной компоненты скорости пучка.

#### *Список литературы*

- [1] А.Н. Скринский, В.В. Пахромчук, “Методы охлаждения заряженных частиц”//“Физика элементарных частиц и атомного ядра”, 1981, том 12, вып. 3

А.Е. АКСЕНТЬЕВ<sup>1,2</sup>, Ю.В. СЕНИЧЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Forschungszentrum Juelich GmbH, Юлих, Ю Германия*

<sup>3</sup>*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

## **ДЕКОГЕРЕНЦИЯ СПИНА В СТРУКТУРЕ С ЗАМОРОЖЕННЫМ СПИНОМ, ЕЁ ПОДАВЛЕНИЕ И ЭФФЕКТ НА ЭДМ СТАТИСТИКУ В МЕТОДЕ FREQUENCY DOMAIN**

Рассмотрены причины возникновения явления декогеренции спина в накопительном кольце, построенном по принципу «замороженного спина», а также способ его подавления с помощью введения в структуру секступольных полей. Проведена симуляция для анализа характера его влияния на оценку частоты прецессии вектора поляризации пучка.

А.Е. AKSENTYEV<sup>1,2</sup>, Y.V. SENICHEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Forschungszentrum Juelich GmbH, Juelich, Germany*

<sup>3</sup>*Institute for Nuclear Research/ of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **SPIN DECOHERENCE IN A FROZEN SPIN LATTICE, ITS SUPPRESSION AND EFFECT ON THE FREQUENCY DOMAIN EDM STATISTIC**

Origins of spin tune decoherence in a “Frozen Spin” storage ring are considered, as well as a method of its suppression by means of introduction of sextupole fields into the lattice. A simulation was carried out in order to assess its effect on the beam polarization precession frequency estimate.

Одной из главных проблем экспериментов по поиску Электрического Дипольного Момент (ЭДМ) элементарных частиц методом накопительного кольца является малое время жизни поляризации пучка, также называемое Spin Coherence Time (SCT). Причиной деполяризации является зависимость угловой скорости прецессии спина частицы, определяемой уравнением Т-БМТ, от равновесной энергии частицы. В соответствии с принципом автофазировки, частицы с большей длиной орбиты обладают большей равновесной энергией, а значит и большим спин тюном. [1]

По этой причине, с декогеренцией в накопительном кольце можно бороться введением в структуру секступольных и октупольных элементов. Секступоль силы где магнитная жёсткость, обладает двойным эффектом на декогеренцию: во-первых он меняет коэффициент сжатия орбиты где и функция дисперсии, длина орбиты частицы, а во-вторых, напрямую изменяет длины орбит частиц как где соответственно горизонтальная и вертикальная бета функция и эмиттанс пучка. [1]

Мы просимулировали спин-орбитальную динамику плоского пучка, смещённого от референсной орбиты в вертикальном направлении на и распределённого в плоскости  $y$ - $z$  как в структуре с замороженным спином [2], с E+V элементами наклонёнными вокруг оптической оси на случайные углы, взятые из распределения радиан. В структуре варьировались значения градиента секступоля GSY, подавляющего декогеренцию в вертикальной плоскости, в диапазоне от значения оптимального для идеальной структуры. Вычисленное по формуле значение поляризации пучка через оборот спин-вектор  $i$ -ой частицы фитировалось функцией фитируемые параметры. Мы обнаружили зависимость оценки частоты от среднего уровня спин-тюна центроида пучка. Мы также обнаружили, что, по меньшей мере в данной структуре, средние уровни спин-тюна и компонент оси стабильного спина связаны линейно.

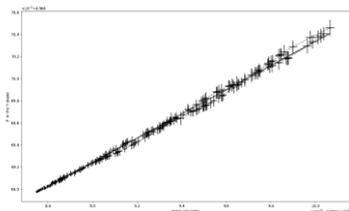


Рис. 1: Зависимость оценки частоты прецессии спина от среднего уровня спин-тюна частицы

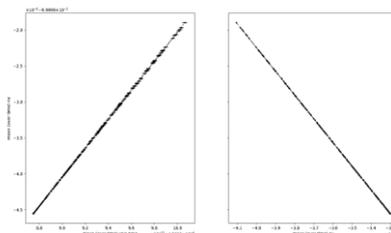


Рис. 2: Зависимость среднего уровня спин-тюна, и радиальной и вертикальной компонент оси прецессии спина частицы

#### Список литературы

- [1] Senichev Y, Zyuzin D. Spin Tune Decoherence Effects in Electro- and Magnetostatic Structures. Proc. Of IPAC'13, Shanghai, China (2013). P. 2579—2581.
- [2] Senichev Y, Andrianov S, Ivanov A, Chekmenev S, Berz M, Valetov V. Investigation of Lattice for Deuteron EDM Ring. Proc. Of ICAP'15, Shanghai, China (2015). P. 2579—2581.

П.А. БЫСТРОВ, Ю.С. ПАВЛОВ

*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва,  
Россия*

**КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА  
В СТАЛЬНОМ ЯРМЕ МАГНИТА СИСТЕМЫ РАЗВЕРТКИ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСКОРИТЕЛЯ УЭЛВ-10-10-С-70**

Представлены результаты исследования влияния гистерезиса в стальном ярме магнита системы развертки на однородность дозы облучения поверхности объектов. Изучено вредное влияние гистерезиса на эффективность облучения на ускорителе УЭЛВ-10-10-С-70, описаны методы устранения этого влияния. Изучена возможность полезного влияния гистерезиса, при котором однородность дозы облучения повышается.

P.A. BYSTROV, YU.S. PAVLOV

*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of Russian Academy of  
Sciences (IPCE RAS), Moscow, Russia*

**CORRECTION OF SCANNING SYSTEM DEFLECTING  
MAGNET CORE HYSTERESYS EFFECT ON ACCELERATOR  
UELV-10-10-S-70 IRRADIATION PERFORMANCE**

Presented are the results of the study of scanning system magnet steel core hysteresis on the irradiation dose uniformity of objects surface. The adverse effect of hysteresis on the efficiency of irradiation at the accelerator UELV-10-10-C-70 was studied, methods for eliminating this effect described. The possibility of obtaining the beneficial effect of hysteresis in which the irradiation dose uniformity is increased is studied.

При реализации радиационных технологий в процессе облучении объектов электронный пучок распределяется в пространстве при помощи отклоняющих магнитов системы развертки. Отклоняющие магниты содержат ферромагнитное ярмо, находящееся под действием переменных магнитных полей. Характерной особенностью ферромагнетиков в переменных полях является наличие петли гистерезиса, влияющей на зависимость действующего магнитного поля от времени, и соответственно на распределение пучка в пространстве и на однородность облучения. В зависимости от условий процесса гистерезис может иметь как полезное влияние, способствующее увеличению однородности

распределения дозовых полей [1] так и вредное, увеличивающее неоднородность и разрушающее подпучковые узлы установки.

Изучен эффект влияния гистерезиса в ярме отклоняющего магнита системы развертки промышленного ускорителя УЭЛВ-10-10-С-70 установленного в радиационном центре ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН. Отрицательное влияние гистерезиса проявилось в локальном перегреве фольги вывода и снижении эффективности использования пучка. Этот эффект потребовал изменить конструкцию магнита системы развертки и скорректировать кривую тока питания магнита. Проведено моделирование системы развертки с гистерезисом при помощи компьютерной программы «Beam Scanning» [2]. Изучены способы устранения негативного влияния гистерезиса и оптимизации системы развертки, включающие подбор марки стали магнитного ярма и изменение формы кривой тока магнита, которые были реализованы на установке ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН.

#### *Список литературы*

- [1] Быстров П. А. Учёт гистерезиса ферромагнитных элементов при разработке системы развёртки пучка // Ядерная физика и инжиниринг. — 2011. — Т. 2, № 5. — С. 441–444.
- [2] Bystrov P. A., Pavlov Yu. S., Prokopenko A. V. et al. Computer program "BEAM SCANNING" for calculation of irradiation processes in radiation-technological installations / Procedia Computer Science. — Elsevier B.V., Amsterdam, the Netherlands. — 2018. — Vol. 145. — P. 123–133.

П.А. БЫСТРОВ<sup>1</sup>, П.Н. ГУЛЯЕВ<sup>2</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ "BEAM SCANNING" И "GEANT4"**

Представлена модель работы радиационной установки на базе компьютерных программ "BEAM SCANNING" и "GEANT4". Промоделированы некоторые эксперименты по токопрохождению электронного пучка и определению профиля дозы по глубине объекта. Показана адекватность модели.

P.A. BYSTROV<sup>1</sup>, P.N. GULYAEV<sup>2</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## **SIMULATION OF ELECTRON BEAM EXPERIMENTS USING THE COMPUTER CODE "BEAM SCANNING" AND "GEANT4"**

A model of the operation of the radiation installation based on the computer code "BEAM SCANNING" and "GEANT4" is presented. Some experiments on the current passage of the electron beam and the determination of the dose profile on the depth of the object are modeled. The adequacy of the model is shown.

При построении новых моделей облучения объектов в радиационных установках важным вопросом является тестирование модели и проверка ее адекватности для изучаемых условий. Это проверка может осуществляться как путем сравнения расчетных и экспериментальных результатов для наиболее показательных экспериментов, так и путем сверки результатов расчетов с полученными на хорошо проверенных, общепризнанных моделях. Кроме того, моделирование экспериментов при помощи компьютерных программ, учитывающих или игнорирующих различные факторы, влияющие на результат эксперимента, позволяет выяснить границы применимости моделей и уточнить эффект и условия влияния этих факторов. Таким образом, моделирование экспериментов в

программах, имеющих существенные различия в алгоритмах расчета, повышает понимание процессов в эксперименте.

Создана численная модель облучения объектов в стерилизационных установках на базе библиотек "GEANT4" [1] с возможностью взаимодействия с компьютерной программой "BEAM SCANNING" [2]. Графический вывод программы показан на рис. 1а. Целью создания модели было проведение численных экспериментов при помощи обеих программ и сравнение результатов. Промоделирован эксперимент по токопрохождению ускоренного электронного пучка через алюминиевую пластину для электронов различной энергии. Результаты моделирования, представленные на рис. 1б, показали совпадение кривых для обеих программ, их близость к кривой, построенной по методике Tabata [3], совпадение с результатами эксперимента [3].

В качестве выводов отметим создание и успешную проверку модели облучения объектов на базе библиотек GEANT4, недостатком которой является медленная скорость расчета и неразработанный интерфейс. Результаты моделирования базового эксперимента для обеих программ совпадают. Дальнейшее развитие модели на базе "GEANT4" позволит расширить область применения программы "BEAM SCANNING".

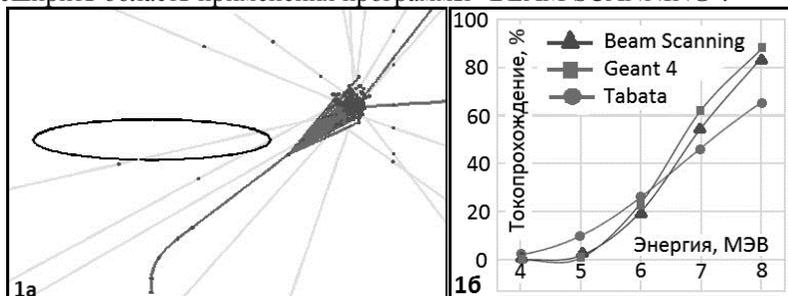


Рис. 1 (а) - отображение отклоненного пучка, прошедшего через фольгу вывода. (б) - результаты расчетов токопрохождения алюминиевой пластины толщиной 1 см. для разных энергий электронов.

#### Список литературы

- [1] Geant4 User's Guide for Application Developers. / электронный документ, режим доступа: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>.
- [2] Bystrov P. A., Pavlov Yu. S., Prokopenko A. V. et al. Computer program "BEAM SCANNING" for calculation of irradiation processes in radiation-technological installations / Procedia Computer Science. — Elsevier B.V., Amsterdam, the Netherlands. — 2018. — Vol. 145. — P. 123–133.
- [3] Tabata T., Ito R. A generalized empirical equation for the transmission coefficient of electrons / Nuclear Instruments and Methods. — 1975. — V.127. — N. 3. — P. 429-434.

Г.П. АВЕРЬЯНОВ, В.А. БУДКИН, В.В. ДМИТРИЕВА  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ПРЕДПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ**

Рассмотрены основные особенности виртуальных компьютерных лабораторий для предварительных предпроектных исследований физических и технических подсистем ускорителей заряженных частиц в рамках единой веб-интегрированной среды моделирования. Приведена структура функциональных блоков, взаимосвязь алгоритмов и структур данных, затронуты вопросы методологии стандартизации интерфейсов при моделировании подсистем ускорителей.

G.P. AVERYANOV, V.A. BUDKIN, V.V. DMITRIEVA  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia*

## **PRE-PROJECT SIMULATION OF SUBSYSTEMS THE CHARGED PARTICLE ACCELERATORS IN THE VIRTUAL ELECTROPHYSICS LABORATORIES**

Considered the main features of virtual computer laboratories for preliminary pre-project studies of physical and technical subsystems of charged particle accelerators within the framework of a unified web-integrated modeling environment. Presented the structure of functional blocks, algorithms and data structures and discussed the methods of interface standardization in modeling accelerator subsystems.

Основу единой веб-интегрированной среды предпроектного исследования физических и технических подсистем ускорителей заряженных частиц в рамках виртуальных электрофизических лабораторий составляют виртуальные компьютерные симуляторы каналов транспортировки пучков частиц высоких энергий, электронных систем ускорителей, вакуумной и мощной импульсной техники [1].

Концепция виртуальной лаборатории отличается от концепции САПР. Виртуальная лаборатория не является инструментом прямого проектирования и в первую очередь нацелена на изучение физических процессов в рассматриваемых устройствах с заранее заданными фиксированными схемами. Несмотря на это, математические модели, изначально разрабатываемые только для моделирования подсистем ускорителей в рамках виртуальных лабораторий, были успешно

использованы при создании специализированной САД-системы для разработки подсистем сильноточных ускорителей заряженных частиц.

Интерфейсы приложений, реализующих функционал виртуальных лабораторий, позволяет собирать схемы изучаемых устройств на мониторе компьютера с помощью щелчков мыши, при этом пользователю приходится иметь дело с уже собранной исследуемой схемой, в которой можно изменять только некоторые элементы и фиксированных позициях и их параметры [2]. Далее функционал виртуальной лаборатории работает в точности как программное обеспечение САПР, используемое для настройки параметров схемы, а результат визуализируется на графиках изучаемых процессов (рис. 1).

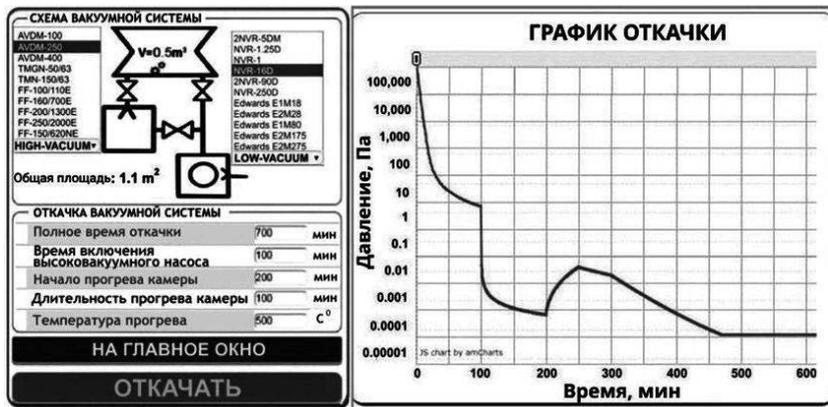


Рис. 1. Схема виртуальной вакуумной лаборатории электрофизики и процесс откачки вакуумной системы

В настоящее время виртуальные лаборатории реализованы в виде кроссплатформенных веб-приложений на базе HTML, CSS и JavaScript с использованием технологий AJAX и CGI. В будущем планируется в полной мере реализовать концепцию Cloud Computing с динамическим распределением вычислительных ресурсов для каждого отдельно запущенного приложения виртуальной лаборатории.

#### Список литературы

- [1] Averyanov G P et al. 2014 Virtual electrophysics laboratories (20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization, BDO, Article number 6890001).
- [2] Averyanov G P et al. 2014 Virtual Laboratory of Vacuum Technique (Proceedings of RuPAC 2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia) pp 110 - 112.

**В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ГИБРИДНОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ**

Проведено расчётное моделирование рабочих режимов системы питания гибридной ускоряющей структуры от автогенератора. Структура включает круглый диафрагмированный волновод с магнитной связью между ячейками и подключённую к его выходу бипериодическую секцию. Моделирование проведено для диафрагмированного волновода, включающего различное число ячеек. Проведён расчёт характеристик развязывающего устройства, обеспечивающего возбуждение автогенератора на рабочей частоте гибридной структуры. Получены зависимости полосы захвата в рабочий режим и коэффициента стабилизации частоты автогенератора от числа ячеек в диафрагмированном волноводе.

**V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY**

*National Research Nuclear University «MEPhI»*

## **COMPUTATIONAL SIMULATION OF OPERATING MODES FOR POWER SUPPLY SYSTEM OF HYBRID ACCELERATING STRUCTURE**

Computational simulation of operating modes for power supply system of hybrid accelerating structure from oscillator was carried out. Structure includes circular diaphragmed waveguide with magnetic coupling between cells and biperiodic section connected to its output. Simulation was carried out for diaphragmed waveguide with different number of cells. Insulator characteristics, which provide the excitation of oscillator at operating frequency of hybrid structure, were calculated. Dependences of capture band in operating mode and stabilization coefficient of oscillator frequency on number of cells in diaphragmed waveguide were obtained.

Гибридная ускоряющая структура обеспечивает высокий КПД, что важно для ускорителей прикладного использования. Структура (см. рис.1) включает группирователь на стоячей волне (бипериодическая секция) и секцию на бегущей волне (круглый диафрагмированный волновод с магнитной связью между ячейками) [1]. Неизрасходованная в секции на бегущей волне мощность передаётся на вход группирователя (бипериодической секции). Для высокочастотного питания гибридной

структуры экономически оправданным является использование магнетронного автогенератора. Анализ требований к системе питания гибридной ускоряющей структуры выполнен в работе [2].

В настоящей работе проведено расчётное моделирование характеристик системы питания гибридной ускоряющей секции от магнетрона с использованием численного решения уравнения генерации в указанной системе. Осуществлён расчёт входного сопротивления ускоряющей структуры, состоящей из секции на бегущей волне, включающей от 4 до 24 ячеек, на выходе которой установлена бипериодическая структура. Бипериодическая структура включала две ускоряющие и одну ячейку связи. Ячейки секций моделировались их эквивалентным схемами.

В ходе моделирования получены зависимости минимальных потерь в развязке, полосы захвата в рабочий режим и коэффициента стабилизации частоты автогенератора от числа ячеек в диафрагмированном волноводе (см. рис. 2, 3, 4). Полученные данные позволяют выработать требования к системе питания, выполнение которых обеспечивает устойчивую и стабильную работу ускорителя.

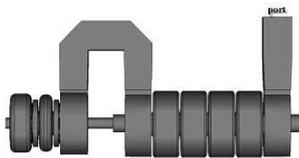


Рис.1.

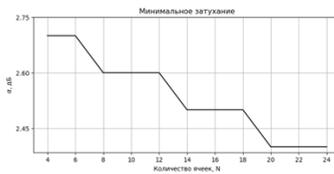


Рис.2.

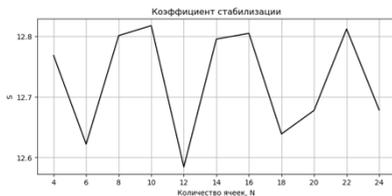


Рис.3.

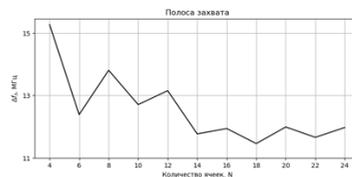


Рис.4.

#### Список литературы

- [1] Hybrid electron linac with standing and travelling wave accelerating sections. Auth.: Matsievskiy S.V. et al. Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, p.1791-1793.
- [2] Каминский В.И., Мациевский С.В. Анализ требований к системе питания гибридной ускоряющей структуры от автогенератора. IV Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» Лаплаз-2018, Сборник научных трудов, М., 2018, с.408-408.

А.А. МАХОРО<sup>1,2</sup>, В.Ю. МЕХАНИКОВА<sup>1,2</sup>, О. А. МОСОЛОВА<sup>1,2</sup>,  
С.М. ПОЛОЗОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва,  
Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва,  
Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ В ПРОТОТИПАХ МАГНИТОВ ОСНОВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ИССИ-4**

В НИЦ «Курчатовский институт» начата реализация проекта ИССИ-4 - нового источника синхротронного излучения 4го поколения. В докладе будут представлены результаты моделирования магнитного поля секступольного, дипольного и дипольного с переменным градиентом магнитов. С помощью программы COMSOL Multiphysics были построены модели этих магнитов и получены трехмерные распределения магнитного поля.

A.A. MAKHORO<sup>1,2</sup>, V.Y. MEKHANIKOVA<sup>1,2</sup>,  
O.A. MOSOLOVA<sup>1,2</sup>, S.M. POLOZOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## **MAGNETIC FIELD SIMULATIONS FOR PROTOTYPES OF THE MAIN RING MAGNETS FOR SSRS-4**

New project of the fourth generation synchrotron light source SSRS-4 is started at the National Research Center "Kurchatov Institute". Results of the magnetic field simulation for the main magnets as sextupole magnet, dipole and dipole with a variable gradient. Using the COMSOL Multiphysics code, three-dimensional distribution of the magnetic field were simulated.

К основным магнитам источников синхротронного излучения относятся поворотные дипольные магниты и фокусирующие квадрупольные магниты. Первые обеспечивают движение заряженных частиц по замкнутой орбите, а вторые отвечают за фокусировку пучка. Для уменьшения эмиттанса пучка требуется компенсировать все возможные нелинейные эффекты, поэтому в магнитную систему включаются также октупольные магниты или дополнительные группы секступолей.

Дипольный магнит может быть выполнен в виде С-образного ярма с двумя катушками (рис. 1а). Средняя индукция магнитного поля на оси магнита может достигать 1,29 Тл. Расчет поля выполнен в программе мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics [1]. Также был промоделирован постоянный дипольный магнит, построенный на основе твердотельных элементов (рис. 1б). Его длина 0,487 м со значением индукции магнитного поля на оси 0,23155 Тл. На рисунке 1 (в) показан общий вид секstupольного магнита. Расчетная модель представляет собой стальное ярмо для замыкания магнитного потока, шесть полюсов, вокруг которых намотаны главные катушки, также дополнительно установлены корректирующие катушки.

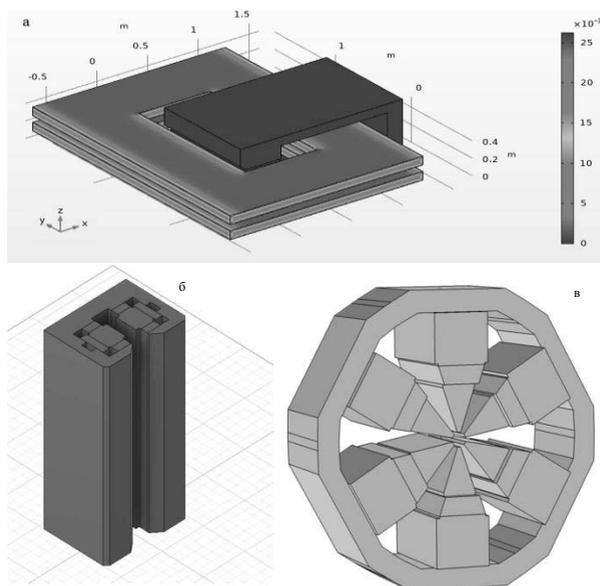


Рис. 1. Модели дипольных магнитов первого (а) и второго (б) типа, а также секstupольного магнита (в)

*Список литературы*

- [1] COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.comsol.ru>

А.А. МАХОРО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## **ИЗЛУЧЕНИЕ ПОВОРОТНЫХ МАГНИТОВ И ВСТАВНЫХ УСТРОЙСТВ ОСНОВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ИССИ-4**

Проведено моделирование синхротронного излучения от поворотных магнитов с постоянным и переменным градиентом магнитного поля. Так же выполнено моделирование излучения от вставных устройств. Дополнительно произведен расчет потерь энергии пучка при прохождении его через поворотные магниты.

А.А. МАKHOPO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## **RADIATION OF BENDING MAGNETS AND INSERT DEVICES OF THE ISIS-4 MAIN RING**

Simulation of synchrotron radiation from bending magnets with a constant and variable magnetic field gradient was carried out. The simulation of radiation from insertion devices was also performed. Additionally, the calculation of the energy loss of the beam during its passage through the rotating magnets was made.

В НИЦ «Курчатовский институт» начата реализация проекта ИССИ-4 - нового источника синхротронного излучения 4го поколения. Основной накопитель на энергию 6 ГэВ длиной около 1300 м рассчитан состоит из 40 периодов структуры типа 7BA. (Band Achromat, ахроматический поворот). Источниками излучения в ИССИ-4 будут являться как некоторые поворотные магниты, так и вставные устройства - ондуляторы и вигглеры.

На периоде предполагается использовать четыре длинных диполя с продольным градиентом магнитного поля и три коротких диполя с постоянным магнитным полем. Размещение магнитов на периоде таково, что два из длинных диполей позволяют установить каналы для вывода излучения. Кроме того, на периоде имеется свободный промежуток длиной около 5,5 м, в котором можно разместить одно или два вставных устройства.

Для расчета характеристик синхротронного излучения, генерируемого поворотными магнитами, и определения его влияния на пучок было проведено моделирование в программе SIREPO [1]. В дополнении к этому

был произведен аналитический расчет энергетических потерь в кольце. Так же с помощью программы SIREPO были определены параметры вставных устройств в соответствии с требованиями к характеристикам синхротронного излучения, генерируемого ими.

*Список литературы*

[1] SIREPO [Электронный ресурс]. – URL: <https://beta.sirepo.com>.

В. С. ДЮБКОВ<sup>1,2</sup>, Ю. Ю. ЛОЗЕЕВ<sup>1,2</sup>, Т. А. ЛОЗЕЕВА<sup>1,2</sup>,  
В. Ю. МЕХАНИКОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва,  
Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## **ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ ОСНОВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИССИ-4 ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ АПЕРТУРЫ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ**

В НИЦ «Курчатовский институт» начата реализация проекта ИССИ-4 – нового источника синхротронного излучения 4го поколения. Основной накопитель ИССИ-4 длиной около 1300 м рассчитан на энергию 6 ГэВ и состоит из 40 периодов структуры типа 7BA (Band Achromat, ахроматический поворот). За основу структуры взята магнитная система накопителя ESRF-EBS, в центральной части периода которой из-за ограничения на длину кольца, которое будет размещено в действующем туннеле, апертуру канала пришлось уменьшить до 13 мм. Так как для ИССИ-4 в настоящее время ограничение по длине не установлено, было принято решение увеличить в центральной части периода апертуру до 18 мм, для чего была модернизирована магнитная структура ИССИ-4.

V.S. DYBKOV<sup>1,2</sup>, Y. Y. LOZEEV<sup>1,2</sup>, T. A. LOZEEVA<sup>1,2</sup>,  
V.Y. MEKHANIKOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## **OPTIMIZATION OF THE MAIN RING MAGNETIC STRUCTURE FOR THE SYNCHROTRON LIGHT SOURCE SSRS-4 TO INCREASE THE APERTURE OF THE VACUUM CHAMBER**

The starts the implementation of the project ISCI-4 - New project of the fourth generation synchrotron light source SSRS-4 is started at the National Research Center "Kurchatov Institute". The main ring with a length of about 1300 m. It is designed for the energy of 6 GeV and consists of 40 periods based on the 7BA structure (Band Achromat). The structure is based on the magnetic layout of new ESRF-EBS light source in which the channel aperture in central part of the period had to be reduced to 13 mm due to the restriction on the ring length. Since for the ISCI-4 we are not limited

on the length, it was decided to increase the aperture to 18 mm. To increase the aperture of the vacuum chamber, the magnetic structure of the SSRS-4 was modified.

Период магнитной структуры ИССИ-4 состоит из дрейфовых промежутков, дипольных, в том числе комбинированных, квадрупольных, сексупольных и октупольных магнитов. Основной накопитель включает 40 периодов длиной около 31 м с магнитной структурой типа 7BA (Band Achromat, ахроматический поворот). За основу структуры основного накопителя взята структура модернизируемого в настоящее время источника ESRF-EBS (Гренобль, Франция). Оптимизация структуры основного накопителя ИССИ-4 и моделирование динамики пучка проводилось с использованием пакета программ MAD-X. MAD X - это универсальный инструмент для проектирования и исследования оптики заряженных частиц в ускорителях со знакопеременным градиентом и каналов транспортировки [1]. Из-за необходимости размещения EBS в имеющемся туннеле длиной около 840 м апертуру вакуумной камеры в центральной части периода пришлось уменьшить до 13 мм. Поскольку величина накопленного циркулирующего тока пропорционально величине апертуры вакуумной камеры, то магнито-оптическую структуру ИССИ-4 планируется разрабатывать с величиной апертуры не менее 18 мм.

В ходе расчетов выполнено исследование влияния каждого из магнитных элементов на значение динамической апертуры (ДА) с помощью программ MADX и elegant. Максимальное значение ДА может быть получено путём оптимизации градиентов многопараметрической задачи. Было исследовано влияние на величину ДА градиентов квадрупольных, которые находятся как в центральной части периода, так и по краям. Для этого рассмотрены три набора параметров структуры относительно каждого из квадрупольных и получен набор оптимальных значений градиента магнитного поля в них.

*Список литературы*

- [1] H. Grote, F. Schmidt et al. // The MAD-X Program (Methodical Accelerator Design). Version 5.02.09. User's Reference Manual — 2016.

О.А. МОСОЛОВА<sup>1,2</sup>, В.С. ДЮБКОВ<sup>1,2</sup>, С.М. ПОЛОЗОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## **СТРУКТУРА КОМПАКТНОГО БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА ИССИ-4**

Статья посвящена результатам моделирования динамики в компактном бустере для источника синхротронного излучения ИССИ-4. Бустер рассчитан на энергию 6 ГэВ, длина орбиты составляет 300 м. Он состоит из 20 суперпериодов типа DBA (Double Bend Achromat). Разработана общая структура магнитов бустера, супер-период которого состоит из двух поворотных магнитов, восьми квадруполов, семи секступолов. С помощью программы MAD-X рассчитана бета-функция и другие оптические характеристики для суперпериода.

O.A. MOSOLOVA<sup>1,2</sup>, V.S. DYUBKOV<sup>1,2</sup>, S.M. POLOZOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

## **THE STRUCTURE OF A COMPACT BOOSTER SYNCHROTRON FOR SSRS-4**

Results of the beam dynamics simulation for the compact booster of the synchrotron light source SSRS-4 will be presented in the report. The booster is designed for the energy of 6 GeV. Its orbit length is equal to 300 m and it includes 20 superperiods of DBA (Double Bend Achromat) type. The general lattice of the booster was designed. Its superperiod will include two bending magnets, eight quadrupoles, seven sextuples. Beta-function and other optical functions will be also simulated for superperiod with the help of the MED-X program.

Специализированный источник синхротронного излучения четвертого поколения (ИССИ-4) планируется создать в НИЦ «Курчатовский институт», на базе Института физики высоких энергий в г. Протвино. Предполагается, что ИССИ-4 будет включать в себя как накопительное кольцо, так и лазер на свободных электронах, а один линейный ускоритель будет использоваться для инжекции в синхротрон и в качестве драйвера пучка для ЛСЭ. В качестве альтернативного более простого и дешевого инжектора рассмотрены компактный и полноразмерный

(размещенный в том же тоннеле, что и основной накопитель) бустерный синхротрона. Бустер будет использоваться для инъекции в основное кольцо и в режиме инъекции на полной энергии (top-up injection) [1]. Структура компактного бустера состоит из 20 суперпериодов типа DBA (Double Bend Achromat). Данная структура является простой, надежной и компактной и используется для многих источников синхротронного излучения второго и третьего поколений. Суперпериод состоит из двух поворотных магнитов, восьми квадруполей, семи секступолей, длина периода составляет 15 м. Структура обеспечивает величину бета-функции  $\beta_x=17,25$  м (горизонтальная) и  $\beta_y=16,63$  м (вертикальная), дисперсию  $D_x=0,04$ , хроматизм  $DQ_x = -28.76$ ,  $DQ_y = -28.4$ . Поперечный эмиттанс пучка составляет 10 нм рад . Энергия инъекции была выбрана равной 208 МэВ. На рисунке 1 показаны бета- функции и дисперсионные функции на одном суперпериоде.

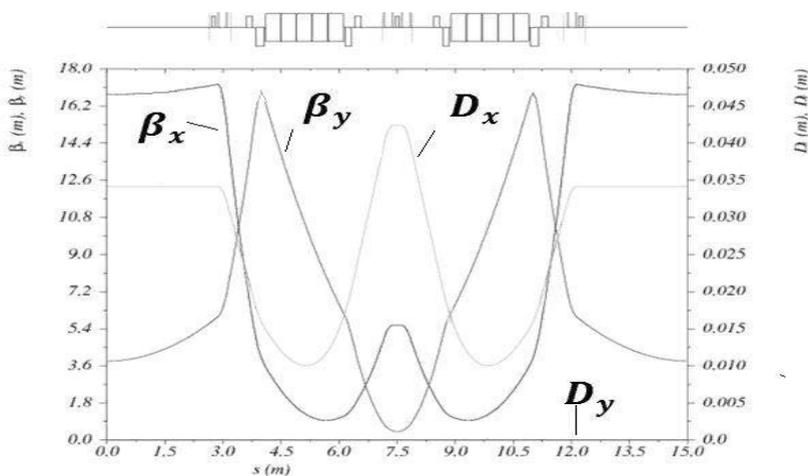


Рис. 1. Бета-функция на одном суперпериоде бустерного синхротрона

*Список литературы*

- [1] Emery L. and Borland M. // Upgrade Opportunities at the Advanced Photon Source Made Possible by Top-Up Operations. EPAC 2002.

В.В. КОНДРАТЕНКО<sup>1</sup>, Н.С. ШИШКИНА<sup>1</sup>,  
О.В. КАРАСТОЯНОВА<sup>1</sup>, Н.И. ШАТАЛОВА<sup>1</sup>, Н.В. КОРОВКИНА<sup>1</sup>,  
Н.М. СТЕПАНИЩЕВА<sup>1</sup>, В.Т. ТАРАСЮК<sup>1</sup>, Н.И. ФЕДЯНИНА<sup>1</sup>,  
М.Т. ЛЕВШЕНКО<sup>1</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ВНИИТеК – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН,  
Видное, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ ОВОЩЕЙ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ**

В работе представлены результаты исследований эффективности обработки листовых овощей электронами с энергией до 10 МэВ для ингибирования фитопатогенной микрофлоры, сокращения потерь и продления срока хранения. Особенностью исследования является комплексное использование обработки ионизирующими излучениями, полимерной упаковки с избирательной газопроницаемостью и холодильного хранения. Получены режимы комплексной обработки листовых овощей для предреализационного хранения, обеспечивающие ингибирование фитопатогенной микрофлоры и увеличения срока хранения до 12 суток.

V.V. KONDRATENKO<sup>1</sup>, N.S. SHISHKINA<sup>1</sup>,  
O.V. KARASTAYANOVA<sup>1</sup>, N.I. SHATALOVA<sup>1</sup>,  
O.V. KOROVKINA<sup>1</sup>, N.M. STEPANNICHEVA<sup>1</sup>,  
N.I. FEDIANINA<sup>1</sup>, M.T. LEVSHENKO<sup>1</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>VNIITek - branch of the FGBNU «FNTS food systems. V.M. Gorbatov» RAS,  
Vidnoye, Moscow region, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Russia

## **RESEARCH OF PROCESSING EFFICIENCY OF SHEET VEGETABLES BY ACCELERATED ELECTRONS**

The paper presents the results of studies of the efficiency of processing leafy vegetables with ionizing radiation (electrons up to 10 МэВ) to inhibit phytopathogenic microflora, reduce losses and extend shelf life. A special feature of study is the complex use of ionizing radiation processing, polymer packaging with selective gas permeability and refrigerated storage. Modes of complex processing of leafy vegetables for pre-sale storage were obtained. The modes provide inhibition of phytopathogenic microflora and increase the shelf life up to 12 days.

Процесс хранения свежей растительной продукции носит многофакторный характер, что обуславливает целесообразность оптимизации его путем применения комплекса методов, синергически действующих на объекты и условия хранения. Радиационный способ обработки пищевых продуктов достаточно универсален, его можно применять для широкого ассортимента продукции в любой упаковке.

Данная проблема актуальна для листовых овощей, так как за счет их упаковки, облучения и холодильного хранения возможно воздействовать на факторы лежкости (убыль массы, потери от порчи и замедление процессов старения тканей) с целью продления сроков хранения продукции. Выполнены исследования по комплексному использованию обработки ускоренными электронами энергией до 10 МэВ и дозой 3 кГр, полимерной упаковки с избирательной газопроницаемостью и холодильного хранения. Облученный в полимерной упаковке шпинат исследовали в течение хранения стандартными технологическими и микробиологическими методами, имеющимися в лабораториях ВНИИТеК.

Установлено, что комплексное использование обработки ионизирующими излучениями листовых овощей, полимерных упаковок для модифицирования состава газовой среды и холодильных условий хранения позволяют обеспечить синергический эффект воздействия по продлению бездефектного периода хранения продукции. Обработка ионизирующими излучениями листовых овощей, сохраняемых в полипропиленовой упаковке с избирательной газопроницаемостью, позволяет сформировать газовую среду с повышенным содержанием  $\text{CO}_2$  в более короткие сроки и поддерживать ее на протяжении первого этапа хранения (до 5 суток), что обеспечивает регулирование процесса дыхания и создает условия для антисептирования продукции. Показано, что обработка оптимальными дозами ускоренных электронов обеспечивает эффективное подавление фитопатогенной микрофлоры (бактерий, плесневых грибов, дрожжей) и лучшее сохранение исходного качества продукции в условиях холодильного хранения. Для хранения листовых овощей (шпината и рукколы) предложено упаковывание сырья в пакеты из полипропиленовой плёнки, с последующей обработкой ускоренными электронами дозами до 3 кГр, что совместно с холодильным хранением обеспечивает продление периода хранения с 5 до 12 суток. Отмечена сохранность упаковки из полипропилена после облучения и холодильного хранения, что даёт возможность её использования для применения радиуризации и холодильного хранения зелени.

В.Т. ТАРАСИЮК<sup>1</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>1,2</sup>, С.Ю. КУПРЕЕНКО<sup>3</sup>,  
Н.Е. СТРОКОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*ВНИИТеК – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН,  
Видное, Московская область, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия*

## **ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛЕНОЧНОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ПОЛИАМИД/ПОЛИЭТИЛЕН ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ**

Работа посвящена исследованию многослойного пленочного материала полиамид/полиэтилен толщиной 80 мкм после его обработки электронным пучком энергией 10 МэВ дозами от 3 до 18 кГр на двух радиационно-технологических установках. Изучалась структура полимерного материала до и после облучения каждого слоя.

V.T. TARASYUK<sup>1</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>1,2</sup>, S.YU. KUPREENKO<sup>3</sup>,  
N.E. STROKOVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*VNIITek - branch of the FGBNU «FNTS food systems. V.M. Gorbатов» RAS,  
Vidnoye, Moscow region, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Russia*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University (MSU), Russia*

## **STRUCTURE STUDY OF POLYMER FILM MATERIAL (POLYAMIDE/POLYETHYLENE) UNDER IRRADIATION AT ELECTRON ACCELERATORS**

The work is devoted to the study of multilayer film material polyamide / polyethylene with a thickness of 80 microns after its processing by an electron beam with energy of 10 MeV in doses from 3 to 18 kGy at two radiation processing plants. The structure of the polymer material before and after irradiation of each layer was studied.

Сроки хранения пищевой продукции значительно зависят от упаковочного материала. Облучение продукции проводят в упаковке для уменьшения рисков микробиологического заражения. В результате происходит как подавление микрофлоры, так и возникновение нежелательных химических процессов в упаковочных материалах. Особенно существенные радиационные эффекты могут возникать при

использовании полимерных пленочных материалов, использующиеся для упаковки свежей плодовоовощной продукции. Для изучения эффектов облучения упаковочных материалов проведено исследование влияния радиационной обработки электронным пучком на структуру многокомпонентного упаковочного полимерного материала на разных ускорительных установках.

Для исследования использовался полимерный упаковочный материал полиамид/полиэтилен (РА/РЕ) в соотношении 20:80, толщиной 80 мкм производства Дмитровского завода гибкой упаковки (ДЗГУ). Радиационная обработка в дозах от 3 до 18 кГр проводилась на двух ускорителях электронов на энергию 10 МэВ. Облучение проводилось в 2017 году в Федеральном медико-биологическом центре им. А.И. Бурназяна на радиационно-технологической установке с ускорителем электронов УЭЛР-10-10-40 и в 2018 году в коммерческой компании ООО «Теклеор» на ускорителе электронов УЭЛР-10-15-С-60-1. Дозовые характеристики контролировались с использованием пленочных дозиметров.

Проводились исследования структуры образцов до и после облучения. Для этого снимали ИК-спектры в интервале  $400\text{-}5000\text{ см}^{-1}$  при помощи ИК-спектрометра ФСМ 1202 (Россия) со спектральным диапазоном  $400\text{-}5000\text{ см}^{-1}$  и разрешением  $\sim 1\text{ см}^{-1}$ . Изменение спектров поглощения в ИК диапазоне позволяет определить изменение количества ряда функциональных групп. Изучение ИК спектров пленки РА/РЕ обработанной быстрыми электронами с дозой до 18 кГр на ускорительных установках показало, что в облученном образце РА/РЕ уменьшается количества  $\text{-CH}_3$  и  $\text{-NH-}$  и  $\text{-COO-}$  функциональных групп. Результаты воспроизведения интенсивности полос поглощения функциональных групп при обработке на установке в ООО «Теклеор» отмечаются меньшей дисперсностью в сравнении с результатами ИК спектров образца на установке, располагаемой в Федеральном медико-биологическом центре им. А.И. Бурназяна.

Полимерный материал полиамид/полиэтилен обработанный быстрыми электронами при изучении структуры отмечается стабильные результаты по дисперсии и не влекут за собой значительных изменений в структуре при облучении до 18 кГр на установке УЭЛР-10-15-С-60-1 в ООО «Теклеор». По результатам изучения структуры для проведения более детальных исследований планируется отработать методику облучения образцов.

М.А. ГУЗОВ<sup>1</sup>, А.В. ИЛЬИНСКИЙ<sup>2</sup>, В.И. РАЩИКОВ<sup>1</sup>,  
В.Г. ЦЕЙТЛИН<sup>2</sup>, А.Е. ШИКАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт геофизических и радиационных технологий МАН ВШ, Москва, Россия

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА

Приводятся результаты математического моделирования сигналов импульсного нейтронного каротажа нефтяных скважин для тестирования алгоритмов и компьютерных программ анализа состояния пластов содержащих флюид с использованием методов временной спектрометрии. В основе модели лежит представление об экспоненциальном спаде нейтронной плотности в геофизической среде, учитывающее случайный характер генерации нейтронных вспышек ускорительной трубкой и регистрации тепловых нейтронов или гамма-квантов радиационного захвата.

M.A. GUZOV<sup>1</sup>, A.V. ILYINSKIY<sup>2</sup>, V.I. RASHCHIKOV<sup>1</sup>,  
V.G. TSEITLIN<sup>2</sup>, A.E. SHIKANOV<sup>1</sup>,

*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geophysical and Radiation Technology of IA SHS, Moscow, Russia*

Mathematical modeling results of pulse neutron oil well logging signal for testing of algorithm and computer codes for condition analysis of oil bad with fluid with the help of time spectrometry methods are discussed. The model based on the idea of neutron density exponential decay in geophysical medium including random character of neutron flash generated by accelerating tube and thermal neutrons or gamma-quantum radiative capture registration.

Импульсный нейтронный каротаж (ИНК) используется в промышленной геофизике для выделения пластов, насыщенных продуктивным углеводородом на фоне пластов насыщенных водой, характеризующихся аномально высоким макросечением радиационного захвата нейтронов  $\Sigma$  из-за наличия в них солей. Для его осуществления в скважине с помощью ускорительной трубки (УТ), работающей в импульсно- периодическом режиме, формируют поле тепловых нейтронов с пространственно-временным распределением на оси скважины-

$$n(t, z) \approx A_n(z) \exp(-\lambda_n t) + A_c(z) \exp(-\lambda_c t),$$

где  $z$ - координата, откладываемая по стволу скважины,  $A_{n,c}(z)$  - коэффициенты, связанные с диффузией нейтронов,  $\lambda_{n,c}$ - декременты спада нейтронной концентрации в пласте и скважине соответственно.

Декремент  $\lambda_{п-\Sigma}$ . Поэтому он является основным каротажным параметром необходимым для выделения продуктивных пластов.

В процессе ИНК измерение плотности нейтронного потока осуществляется на временной базе длительности  $T$ -мс. Она разбивается на  $K$  окон длительностью  $\Delta_k$ , в которых производится регистрация нейтронов. В результате формируется временной спектр в виде вектора  $\mathbf{N}=\{N_k\}$  размерности  $K$ , где  $N_k$  – счет нейтронов в окне с номером  $k$ . Декременты  $\lambda_{п.с}$  определяются путем минимизации квадратичной формы вида:  $G(\mathbf{w})=(\mathbf{N}-w_1\mathbf{H}+w_2\mathbf{F})^2+\varepsilon\Omega(\mathbf{w})$  по вектору  $\mathbf{w}=\{w_1, w_2\}$  [1]. Здесь  $\varepsilon$  и  $\Omega(\mathbf{w})$  соответственно параметр регуляризации и стабилизирующая квадратичная форма, подбираемые в процессе настройки компьютерной программы,

$$\mathbf{H} = T^{-1} \left\{ \Delta_k \sum_{i=k}^K N_i \right\}, \mathbf{F} = T^{-2} \left\{ \Delta_k \sum_{i=k}^K \Delta_i \sum_{j=i}^K N_j \right\}.$$

Искомые декременты определяются через компоненты вектора  $\mathbf{w}$ :

$$\lambda_{п.с} = 0.5T^{-1}w_1(1 \pm \sqrt{1 + 4w_2w_1^{-2}}).$$

Алгоритм требует настройки. Оценку параметра регуляризации, обеспечивающего устойчивую работу алгоритма, можно сделать при рассмотрении тестовой задачи с компьютерной имитацией временного спектра в виде:  $\tilde{\mathbf{N}} = \{\tilde{N}_k\}$ ,

$$\tilde{N}_k = g[B_k \exp(-\lambda_{п} \sum_{i=0}^{k-1} \Delta_i) + C_k \exp(-\lambda_{с} \sum_{i=0}^{k-1} \Delta_i)],$$

$g$ - случайное число генерируемое по распределению Гаусса со средним единичным значением, моделирующее нестабильность срабатывания УТ, число в квадратных скобках зашумляется в соответствии с распределением Пуассона и моделирует счет нейтронов в окнах.

В процессе реализации тестовой задачи по описанному выше алгоритму находят имитационные значения декрементов и сравнивают их с заданными в имитационном временном спектре. При их несовпадении корректируют значения параметра регуляризации и стабилизирующей квадратичной формы, добиваясь максимального сближения задаваемых и полученных значений декрементов.

Данная работа выполнена в рамках соглашения №15-19-00151 о предоставлении гранта РФФИ.

#### Список литературы

- [1] I. Startsev A.A., Fedyna E.A., Shikanov A.E. Algorithm for decomposition of PNL response. Applied Radiation and Isotopes, 1997, 48(10-12), pp. 1329-133

**Н.Е. РОЗАНОВ**

*Московский радиотехнический институт Российской Академии Наук, Москва,  
Россия*

## **ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СИЛЬНОТОЧНОЙ ЛАМПЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

Проведены расчеты динамики сильноточного электронного пучка в лампе бегущей волны, усиливающей СВЧ сигналы в широкой полосе частот до больших мощностей. Рассмотрены проблемы ввода пучка с катода большого диаметра в канал замедляющей структуры малого диаметра. Проведено моделирование динамики пучка в магнитной периодической фокусирующей системе совместно с расчетом профилей магнитного поля с учетом реальных магнитоактивных элементов в ней. Рассчитана амплитудно-частотная характеристика лампы.

**N.E. ROZANOV**

*Moscow Radiotechnical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **ELECTRON BEAM DYNAMICS IN HIGH-CURRENT TRAVELLING WAVE TUBE**

The calculations of the dynamics of a high-current electron beam in a traveling wave tube amplifying microwave signals in a wide frequency band to high power are carried out. The problems of input the beam from cathode of large diameter into small-diameter channel of slow-wave structure are considered. The simulation of beam dynamics in a magnetic periodic focusing system together with the calculation of the magnetic field profiles taking into account the real magneto-active elements in it is carried out. The amplitude-frequency characteristic of the tube is calculated.

Одной из основных задач при разработке ламп бегущей волны новых диапазонов является получение больших выходных СВЧ мощностей [1]. Основным прямым методом достижения цели при этом служит использование электронных пучков с большими токами. Тогда при фиксированном электронном КПД выходная СВЧ мощность может расти пропорционально току пучка. Главной проблемой на этом пути является ввод такого сильноточного пучка в канал транспортировки. С ростом тока пучка приходится использовать катоды все большего диаметра, чтобы не увеличивать плотность тока термоэмиссионного катода. Поэтому растут трудности ввода такого пучка в канал.

В представленной работе проведены расчеты процесса формирования пучка в инжекторе с кольцевым катодом 10-мм диаметра и ввода его в канал замедляющей структуры малого радиуса. Для рассматриваемого

диапазона частот "родным" является канал структуры с радиусом 1.5 мм. Инжектор имеет приосевой электрод, позволяющий эффективно управлять включением и выключением тока пучка. Характерным током является значение около 2.5 ампер при напряжении на уровне 20 кВ. При электронном КПД около 20% такой пучок позволяет генерировать СВЧ сигналы с мощностью до 10 кВт, достаточной для различных применений. Однако при этом появляется трудность, связанная с попаданием внутренних слоев пучка на ось системы, с сильным возрастанием сил пространственного заряда пучка, и с его последующим разлетом, не позволяющим транспортировать его в каналах малого диаметра.

Для устранения нежелательного эффекта перефокусировки внутренних слоев трубчатого пучка используется слабое замагничивание катода. Наличие магнитного поля на уровне 50 Гс на катоде приводит к закручиванию траекторий электронов, предотвращает перефокусировку пучка и сильный последующий его разлет. Увеличение же равновесного радиуса пучка при таком небольшом магнитном поле на катоде оказывается слабым.

Следующей задачей является "подхват" такого пучка из инжектора магнитным полем периодической фокусирующей системы [2]. Решается она путем выбора формы и размеров деталей структуры на входе в нее, обеспечивающих минимальные пульсации огибающей пучка в канале замедляющей структуры.

Далее следует расчет процесса усиления СВЧ сигналов во всей рабочей полосе [3]. Результатом его является амплитудно-частотная характеристика прибора с выходными мощностями на уровне 10 кВт в полосе частот шириной около 25%.

#### *Список литературы*

- [1] Белугин В.М., Васильев А.Е., Ветров В.В., Розанов Н.Е. Разработка, методы расчета и создание широкополосных ламп бегущей волны для непрерывного режима работы. Препринт 2005-03, МРТИ РАН, М., 2005, 20 с.
- [2] Алексеев В.П., Розанов Н.Е., Шкелю В.В. Разработка, методы расчета и создание магнитных фокусирующих систем на постоянных магнитах для компактных ламп бегущей волны. Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. М.: МИФИ, 7, 193 (2006).
- [3] Розанов Н.Е. Программа "LBV-2.5D" для расчета процесса усиления электромагнитных волн электронным пучком. Научная сессия МИФИ-2002. Сборник научных трудов. М.: МИФИ, 7, 124 (2002).

В.С. ДЮБКОВ<sup>1,2</sup>, А.С. ПАНИШЕВ<sup>2</sup>, С.М. ПОЛОЗОВ<sup>1,2</sup>,  
В.Л. ШАТОХИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ИССИ-4

В настоящее время начато проектирование вакуумной системы Специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4. Выполняются исследования по определению основных параметров вакуумной системы и ее структуры. Рассматриваются базовые подходы к моделированию элементов вакуумной системы, расчету уровня вакуума вдоль траектории движения заряженных частиц. Значительное внимание уделяется вопросам выбора расчетных моделей, определению характеристик внутренних поверхностей вакуумных камер системы источника синхротронного излучения.

V.S. DYUBKOV<sup>1,2</sup>, A.S. PANISHEV<sup>2</sup>, S.M. POLOZOV<sup>1,2</sup>,  
V.L. SHATOKHIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF THE VACUUM SYSTEM OF THE SSRS4

The design of the vacuum system has been started now for the 4th generation Specialized Synchrotron Radiation Source (SSRS4). Basic parameters of the vacuum system and its structure are main objects of the study. Principles of the vacuum system elements modeling and the vacuum simulation in chambers near the charged particles trajectory are considered. The main attention is attended to the choice of computer models and for the specification of vacuum chambers and its internal surfaces parameters.

Работы над проектом по созданию ИССИ-4 начаты в НИЦ «Курчатовский институт» в партнёрстве с Европейским центром синхротронных исследований, ESRF, Гренобль, Франция. В качестве прототипа для определения структуры разрабатываемого проекта ИССИ-4 рассматривается конструкция установки ESRF-EBS [1, 2]. В вакуумной системе накопительного кольца будут использованы ионно-сорбционные насосы и насосы на основе нераспыляемых геттеров. Предварительная откачка для удаления атмосферного газа до запуска сверхвысоковакуумных насосов может выполняться турбомолекулярными насосами. Вакуумные камеры с форкамерой обеспечивают необходимое пространство для прохождения пучков частиц и потока синхротронного излучения, а также размещение высоковакуумных насосов и поглотителей СИ. Главным источником газа становится десорбция с поверхности

поглотителей. Десорбционные газовые потоки могут быть очень большими, особенно во время фазы запуска, но со временем работы установки уменьшаются.

Некоторые вакуумные камеры будут иметь покрытие из нераспыляемого геттера. Такое покрытие снижает термо- и фотодесорбцию. Особенно эффективно применение геттера в протяженных камерах с ограниченной проводимостью. К таким камерам относятся прямолинейные участки для встраиваемых устройств (5 м и более) между стандартными секциями вакуумных камер. Здесь газовые нагрузки вызваны тормозным излучением. Вакуумная система в накопительном кольце должна обеспечивать значение динамического давления порядка  $1 \cdot 10^{-8}$  мбар.

Для моделирования проектируемой вакуумной системы ИССИ-4 используется программа Molflow+, успешно применяемая в CERN для расчета вакуумных систем [3]. Molflow+ позволяет вычислять стационарное давление в любой сложной геометрии вакуумных систем в условиях сверхвысокого вакуума. При таком вакууме столкновениями между молекулами можно пренебречь. Частицы движутся независимо друг от друга, что вполне подходит для моделирования данных условий методом Монте-Карло. В геометрической модели вакуумных камер присутствуют только поверхности, обращенные в вакуум. Свойства таких поверхностей описывают все физические процессы в камерах, связанные с поглощением газов, откачкой, десорбцией, отражением молекул.

Весь периметр синхротронного накопительного кольца разделен на стандартные секции. Каждая секция содержит геометрически идентичные вакуумные камеры. Таким образом, моделирование одной секции отображает процессы во всем кольце. Модель вакуумной секции прототипа была изменена под параметры вакуумной системы ИССИ-4, полученные при расчете структуры проектируемой установки. Выполнены расчеты распределения давления вдоль вакуумного тракта на длине стандартной секции для нагрузки системы пучком при токе 200 мА и дозе 100 А·ч.

#### *Список литературы*

- [1] ESRF Upgrade Programme Phase II (2015-2022) - Technical Design Study ("The Orange Book" 2014); [http://www.esrf.eu/Apache\\_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf](http://www.esrf.eu/Apache_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf)
- [2] M. Hahn et al. Layout of the Vacuum System for a New ESRF Storage Ring / Proc. of 5th Int. Particle Accelerator Conf., IPAC'14, 2014. P. 2314-2316.
- [3] Molflow+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN / <https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>

А.Ю. ЖДАНОВА, И.Д. РУБЦОВА  
*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА В ПОЛЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

Эволюция интенсивного пучка моделируется системой уравнений, описывающих динамику синхронной частицы и произвольной частицы пучка. Для линейного волноводного ускорителя выполнены численное моделирование и оптимизация методом роя частиц.

A.Y. ZHDANOVA, I.D. RUBTSOVA  
*St. Petersburg State University, Russia*

## **MODELING AND OPTIMIZATION OF INTENSE BEAM DYNAMICS IN TRAVELING-WAVE FIELD**

Intense beam evolution is modeled by a system of equations describing synchronous particle dynamics and a motion of any particle of a beam. Numerical simulation and optimization by particle swarm method are performed for linear waveguide accelerator.

Рассмотрим эволюцию пучка в поле бегущей волны как совокупность динамики синхронной частицы и частиц пучка; при этом синхронная фаза меняется вдоль структуры. Такой подход открывает дополнительные возможности для оптимизации процесса [1-3]. Применим его для интенсивного пучка, используя уравнения движения:

$$\frac{d\xi_s}{d\tau} = (\beta\gamma)_s / \sqrt{1 + (\beta\gamma)_s^2}, \quad \frac{d(\beta\gamma)_s}{d\tau} = -\alpha(\xi_s, u_1) \sin(\varphi_s(\xi_s, u_2)),$$
$$\begin{cases} \frac{d\xi}{d\tau} = \beta\gamma / \sqrt{1 + (\beta\gamma)^2}, \\ \frac{d(\beta\gamma)}{d\tau} = -\alpha(\xi, u_1) \sin(\hat{\varphi} + \varphi_s(\xi, u_2)) + F_{int}, \\ \frac{d\hat{\varphi}}{d\tau} = 2\pi(\beta\gamma\sqrt{1 + (\beta\gamma)_s^2} / ((\beta\gamma)_s\sqrt{1 + (\beta\gamma)^2}) - 1). \end{cases}$$

Здесь  $\tau$  – приведенные время;  $\xi, \beta\gamma$  – приведенные координата и импульс частицы (для синхронной частицы – с индексом  $s$ ); функции  $\alpha$  и  $\varphi_s$  – соответственно безразмерная амплитуда ускоряющей волны и синхронная фаза;  $u_1$  и  $u_2$  – векторы параметров;  $\hat{\varphi}$  – отклонение фазы частицы от  $\varphi_s$ ; слагаемое  $F_{int}$  описывает действие кулоновского поля.

Функции  $\alpha(\xi)$  и  $\varphi_s(\xi)$  моделируются тригонометрическими полиномами, компоненты векторов  $u_1$  и  $u_2$  есть значения производных полиномов в узлах сетки. Это позволяет получить гладкие  $\alpha(\xi)$  и  $\varphi_s(\xi)$ .

Рассмотрена задача оптимизации динамики пучка по управлениям  $u_1$  и  $u_2$  с целью обеспечения высокого качества группировки и ускорения. Для оптимизации выбран метод роя частиц [4].

Численное моделирование и оптимизация продольной динамики пучка выполнены для линейного волноводного ускорителя с энергией инжекции 80 кэВ, длиной ускоряющей волны 10 см и длиной структуры 80 см при токе 1А. Оптимизированные функции  $\alpha(z)$  и  $\varphi_s(z)$  ( $z$  – продольная координата) представлены на рисунке в сравнении с функциями, полученными в работе [2] без учета взаимодействия частиц и взятыми как начальные. Сравнение соответствующих характеристик пучка показывает, что оптимизация позволила снизить фазовый разброс на выходе прибора с 1.98 до 1.13 рад, уменьшить относительный разброс по энергиям с 0.52 до 0.29 и повысить коэффициент захвата с 95.5% до 97.5%.

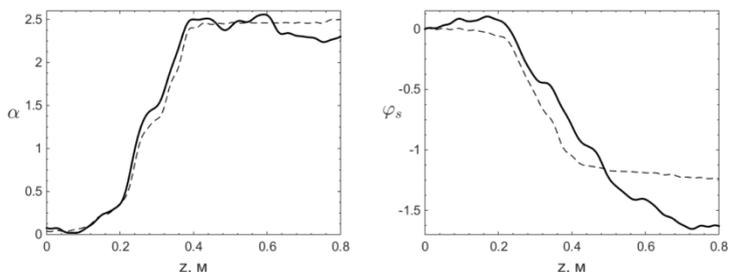


Рис.1 Начальные (штриховая линия) и оптимизированные (сплошная линия) функции  $\alpha(z)$  и  $\varphi_s(z)$

Модель обобщена и представлена интегро-дифференциальными уравнениями, что позволит получить аналитическое выражение вариации функционала качества и использовать градиентную оптимизацию [3].

#### Список литературы

- [1] Ovsyannikov A.D., Ovsyannikov D.A., Altsybeyev V.V., Durkin A.P., Papkovich V.G. Application of Optimization Techniques for RFQ Design // Problems of Atomic Science and Technology, 2014. V. 91, No 3, pp. 116-119.
- [2] Ovsyannikov A.D., Shirokolobov A.Y. Mathematical model of beam dynamics optimization in traveling wave // Proc. RuPAC-2012. Geneva: JACoW <http://www.JACoW.org>, pp. 355-357.
- [3] Ovsyannikov D.A. Mathematical modeling and optimization of beam dynamics in accelerators // Proc. RuPAC-2012. Geneva: JACoW <http://www.JACoW.org>, pp. 68-72
- [4] Kennedy, J. Particle swarm optimization // Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks IV, 1995. Pp. 1942-1948.

**С.Н.АНДРИАНОВ, АЛЬЗАЯДИ ЛАИС Х МАЛЕК**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНО СОСТАВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ ЧАСТИЦ**

В работе рассмотрены методы формализации уравнений динамики частиц в ускорительных системах с использованием матричного формализма представления нелинейных управляющих элементов высоких порядков нелинейности в численном и в символьном виде. Даны примеры соответствующих характеристик управляющих элементов. Проводится сравнение с классическими методами описания соответствующих элементов. Продемонстрирована эффективность представленного метода в сравнении с традиционными методами моделирования систем управления пучками частиц.

**S.N. ANDRIANOV, ALZAYADI LAIS X MALEK**

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

## **MATHEMATICAL MODELING FOR COMPLEX CONTROL SYSTEMS FOR PARTICLE BEAMS**

The paper discusses methods for formalizing the equations of particle dynamics in accelerator systems using the matrix formalism of representing nonlinear control elements of high orders of nonlinearity in the numerical and symbolic forms. Some examples of the corresponding characteristics of control elements are given. A comparison is made with the classical methods of describing the corresponding elements. The efficiency of the presented method is demonstrated in comparison with traditional methods of modeling particle beam control systems.

При моделировании систем управления пучками частиц в ускорительных системах одной из важных проблем является задача математического моделирования нелинейных управляющих элементов с учетом различных факторов, присутствующих в реальных системах (например, с учетом краевых полей). Требования современной ускорительной физики приводят к необходимости построения моделей управляющих элементов, позволяющих проводить параметрические исследования как по влиянию различных факторов на характеристики пучка, так и реализовывать оптимальные режимы управления пучком частиц. Следует отметить, что подобные задачи возникают как в небольших системах, например, в микро- и нанозондовых систем, в циклических ускорителях. Одной из важнейших является задача поиска оптимальных режимов управления с учетом различных факторов, присутствующих в реальных ускорительных системах. В основе предлагаемых методов лежит так называемый матричный формализм описания нелинейной динамики. Следует отметить, что данный

формализм позволяет проводить исследования динамики частиц и ее оптимизацию в терминах двумерных матриц как в символьном (элементы матриц выражаются с помощью аналитических формул), так и в численном представлении (элементы матриц вычисляются в численном виде). Использование в качестве базового представления пучка частиц двумерных матриц (в отличие от традиционного (тензорного) представления, используемого во многих программах физики пучков частиц). В работе рассмотрены основные методы построения соответствующих матриц с учетом различных факторов, присутствующих в реальных ускорительных установках. Приводятся примеры сравнения «традиционных» методов исследования и рассматриваемых в данной работе методов. Следует отметить, что представление управляющих в символьном виде позволяет формировать соответствующие базы данных и использовать их по мере необходимости для решения различных задач динамики частиц в ускорительных системах. Матричное представление позволяет не только описывать управляющий элемент (например, дипольный, квадрупольный и т.д.), но представлять его в виде совокупности матриц, каждая из которых описывает влияние (на пучок) различных составляющих полей, в терминах которых может быть представлен целостный объект. В качестве примера подобных элементов можно указать элементы, отвечающие за краевые поля, различные паразитные параметры, которые могут возникать из-за «неточного» изготовления или из-за неточностей в установке или изготовления (misalignments) и так далее. Общее представление соответствующих матриц в этом случае может быть представлено в виде произведений и сумм матриц, каждая из которых отвечает за соответствующий «физический» объект. Численное и/или символьное использование «готовых» составных элементов позволяет формировать соответствующие базы данных соответствующих элементов и использовать в задачах физики пучков частиц в ускорительных системах. Следует также отметить, что именно символьное представление позволяет проводить процедуры симплектификации соответствующих отображений, как в численном представлении, так и в символьном представлении.

#### *Список литературы*

- [1] Андрианов С.Н. Динамическое моделирование систем управления пучками частиц. СПбГУ. СПб, 2005. С. 366.

И.Д. РУБЦОВА, Л.В. ВЛАДИМИРОВА, Н.С. ЕДАМЕНКО,  
А.Б. ГОНЧАРОВА

*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ АЛЬВАРЕЦА**

Продольная динамика пучка исследуется в поле бегущей волны с переменной синхронной фазой, выбранной в качестве управляющей функции. Динамический управляемый процесс рассматривается как совокупность движения равновесной частицы и движений частиц пучка. При обобщении модель представлена системой интегро-дифференциальных уравнений. Выполнены численное моделирование и многокритериальная оптимизация динамики пучка.

I.D. RUBTSOVA, L.V. VLADIMIROVA, N.S. EDAMENKO,  
A.B. GONCHAROVA

*St. Petersburg State University, Russia*

## **INTENSE BEAM DYNAMICS INVESTIGATION IN ALVAREZ ACCELERATOR**

Longitudinal beam dynamics is investigated in travelling-wave field with variable synchronous phase assumed to be control function. Dynamic controlled process is considered to be a complex of synchronous particle motion and the motions of particles of a beam. In generalization, the model is represented by a system of integro-differential equations. Numerical simulation and multicriteria optimization of beam dynamics are performed.

В работе представлена математическая модель динамики пучка в ускорителе Альвареца в поле эквивалентной бегущей волны. Эволюция пучка описывается как совокупность движения равновесной частицы и движений частиц пучка [1,2,3]. В модели учитывается поле объемного заряда, аналитическое выражение получено в рамках метода крупных частиц; при обобщении модель представляется системой интегро-дифференциальных уравнений аналогично [4,5]. Данная модель достаточно проста и позволяет эффективно осуществить расчет и оптимизацию динамики пучка и выбор параметров структуры. При надлежащем выборе функционала качества имеется возможность получения аналитического представления для его вариации и использования направленных методов оптимизации. Уравнения продольного движения синхронной частицы и частиц пучка имеют вид:

$$\frac{d\xi_s}{d\tau} = p_s / \sqrt{1 + p_s^2}, \quad \frac{dp_s}{d\tau} = u_1(\tau) \cos(u_2(\tau)),$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\xi}{d\tau} = p / \sqrt{1 + p^2}, \\ \frac{dp}{d\tau} = u_1(\tau) \cos(\hat{\varphi} + u_2(\tau)) + F_z^{(int)}, \\ \frac{d\hat{\varphi}}{d\tau} = 2\pi \left( 1 - p\sqrt{1 + p_s^2} / (p_s\sqrt{1 + p^2}) \right). \end{array} \right.$$

Здесь  $\tau, p, \xi$  – приведенные время, импульс частицы и ее координата соответственно; величины с индексом  $S$  характеризуют состояние синхронной частицы;  $u_1(\tau), u_2(\tau)$  – управляющие функции, соответственно безразмерный параметр амплитуды ускоряющей волны и синхронная фаза;  $\hat{\varphi}$  – отклонение фазы частицы от синхронной фазы, слагаемое  $F_z^{(int)}$  характеризует воздействие поля объемного заряда.

Разработаны и реализованы алгоритмы формирования управлений, обеспечивающих требуемую выходную энергию синхронной частицы. Выполнено численное моделирование динамики пучка для ускорителя с начальной энергией 2 Мэв и длиной волны ВЧ поля 0,6925 м. Представлен способ получения параметров структуры (длин периодов, трубок, зазоров) по известным управлениям.

Проведена многокритериальная оптимизация динамики пучка по методике [6] с целью минимизировать рассеяние частиц вокруг синхронной при захвате в ускорение не менее 90% частиц. После оптимизации на выходе прибора фазовая ширина сгустка снизилась с 0.55 рад до 0.40 рад, разброс по энергиям снизился с 0.904 Мэв до 0.802 Мэв.

#### Список литературы

- [1] Ovsyannikov A.D., Ovsyannikov D.A., Altsybeyev V.V., Durkin A.P., Papkovich V.G. Application of Optimization Techniques for RFQ Design // Problems of Atomic Science and Technology, 2014. V. 91, No 3, pp. 116-119.
- [2] Ovsyannikov D.A., Altsybeyev V.V. Mathematical Optimization Model for Alternating-Phase Focusing (APF) Linac // Problems of Atomic Science and Technology, 2013. No 4, p. 93.
- [3] Rubtsova I.D., Suddenko E.N. Investigation of program and perturbed motions of particles in linear accelerator // Proc. **RuPAC**-2012. Geneva: JACoW <http://www.JACoW.org>. Pp. 367-369.
- [4] Rubtsova I.D. Mathematical optimization model of longitudinal beam dynamics in klystron-type buncher // Proc. **RuPAC**-2014. Geneva: JACoW <http://www.JACoW.org>. Pp. 66-68.
- [5] Овсянников Д.А., Едаменко Н.С. Моделирование динамики пучков заряженных частиц. // Вестник Санкт-Петербургского университета, сер. 10, 2013. Вып. 2, с. 61-66.
- [6] Vladimirova L.V., "Multicriterial Approach to Beam Dynamics Optimization Problem", II Conference on Plasma & Laser Research and Technologies (2016), Journal of Physics: Conference Series, Vol. 747, No 1, 012070 (2016); <http://iopscience.iop.org/1742-6596/747/1/012070>

Г.О. БУЯНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ДИНАМИКА МИКРОТЕЛ В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЗЕМЛИ**

Рассмотрена динамика микротел, заряженных в радиационных поясах Земли, с учетом гравитационного и магнитного полей Земли. Приведены результаты расчетов, в частности, изменение размеров потока частиц из космической пыли.

G.O. BUYANOV

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

## **DYNAMICS OF MICROTELS IN EARTH RADIATION BELTS**

The dynamics of micro-objects charged in the radiation belts of the Earth, taking into account the gravitational and magnetic fields of the Earth, is considered. The results of the calculations, in particular, the change in the size of the flow of particles from cosmic dust.

Как известно, приполярные области околоземного космического пространства характеризуются наиболее сильным магнитным полем, причём вектор индукции  $\vec{B}$  направлен практически перпендикулярно поверхности Земли. В таких условиях динамика заряженных микротел представляется очевидной – они либо входят в атмосферу, либо улетают в область локализации радиационных поясов Земли, на расстояния порядка нескольких её радиусов (экваториальная зона).

Траектории микротел сочетают в себе как элементы баллистического движения, так и движения заряженного тела в магнитном поле. Радиус кривизны (R) траектории частицы в магнитном поле можно представить в виде:

$$R = \frac{v^2}{a} = \frac{v^2 m}{q \cdot |[\vec{v} \times \vec{B}]|}$$

где  $v$ ,  $q$ ,  $m$  – скорость, заряд и масса микротела,  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции Земли.

Отсюда несложно выразить соотношение заряда к массе:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{R |\vec{B}| \sin(\varphi)},$$

где  $\varphi$  – угол между векторами скорости и магнитной индукции.

Задав радиусом кривизны, сопоставимым с кривизной силовой линии и длиной предполагаемой траектории (порядка 1000 км), а также характерным значением индукции магнитного поля вблизи полюса ( $\sim 5 \times 10^{-5}$  Тл), а также практически реализуемой скоростью микротел можно оценить соотношение заряда к массе на уровне  $\sim 10^{-1}$  Кл/г при дальнейших расчетах.

Исследование динамики ансамблей таких микротел было выполнено путём численного моделирования. Был использован ранее программно-математический аппарат [1]. Имеющаяся программа была дополнена комплексом вспомогательных подпрограмм и функций, написанных на языке MATLAB. Благодаря данным

дополнениям стало возможно выполнять анализ движения с учётом гравитационного поля, а также заметно быстрее вычислять и обрабатывать траектории сравнительно медленно движущихся микротел (единицы, десятки км/с).

В рамках расчётной модели рассматривался запуск ансамбля микротел с соотношением заряда к массе от 0,1 до 1 Кл/г. Запуск микротел осуществлялся в северном направлении вдоль меридиана, на  $60^\circ$  северной широты с высоты 300 км, со скоростью 25 км/с. Пример продольной огибающей однозарядного сгустка космической пыли изображен на рис. 1.

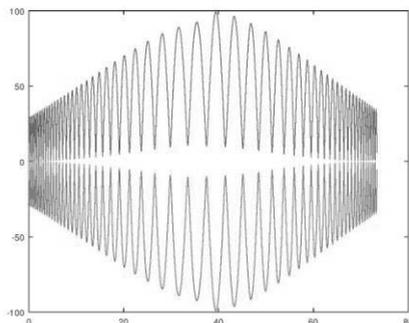


Рис. 1. Вид продольной огибающей однозарядного сгустка космической пыли.

Также рассматривались был рассмотрен вариант, когда начальные параметры частиц формировались на основе начальной энергии в 100 кэВ и начальных координат, соответствующих высоте 300 км над уровнем моря,  $45^\circ$  северной широты. Скорость частиц направлена вдоль силовой линии магнитного поля, по направлению от Земли. При этом конечная точка траектории соответствует  $45^\circ$  южной широты.

Результаты данных расчетов могут объяснить наличие микроотверстий в космических аппаратах типа орбитальной космической станции "Мир".

#### *Список литературы*

- [1] Баев В.К., Нестерович А.В., Свирин В.Ю. Динамика заряженных частиц в поле магнитного сферического диполя. Журнал технической физики. Том 82, № 1, 2012. С. 139-142.

Г.О. БУЯНОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ, В.А. СЕНИУКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **УСКОРЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ ТРУБЧАТОЙ КОНФИГУРАЦИИ ЗА СЧЕТ ИСПАРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ**

Рассмотрен новый принцип ускорения, заключающийся в одновременном ускорении и удержании на оси сферических объектов. Описаны процессы, возникающие при воздействии мощного лазерного излучения на их поверхность. Представлены расчёты движения траекторий тел различного диаметра.

G.O. BUYANOV, A.V. NESTEROVICH, V.A. SENYUKOV

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

## **ACCELERATION OF SPHERICAL OBJECTS BY A LASER BEAM TUBULAR CONFIGURATION BY SURFACE EVAPORATION**

A new principle of acceleration is considered, which consists in the simultaneous acceleration and retention of spherical objects on the axis. The processes that occur when exposed to high-power laser radiation on their surface are described. Represented calculations of the movement of the trajectories of bodies of different diameter.

Одним из возможных применений лазера с пучком трубчатой конфигурации является ускорение сферических объектов за счет испарения поверхности. Рассмотрен принцип ускорения небольших объектов потоком электромагнитного излучения высокой интенсивности с их одновременным удержанием на оси.

Для изучения получения импульсов ускорения мишени был применен метод расчета скоростей их направленного движения при воздействии мощного лазерного излучения на поверхность. Лазерная плазма, состоящая из различных частиц, разлетается в вакууме, создавая реактивную струю.

В качестве примера рассмотрено воздействие на алюминиевый шар радиусом 2 см с начальной скоростью шара 1000 м/с. Плотность потока энергии ЭМИ  $3 \cdot 10^{11}$  В/см<sup>2</sup> и расходимость луча лазера  $5 \cdot 10^{-4}$  могут обеспечить фокусировку и ускорение тела в канале лазерного луча на расстояние до 350 м. Сквозность импульсов в расчетах равна 2. Схема ускорения микротел лазерным излучением трубчатой конфигурации за счет испарения поверхности показана на рис. 2.

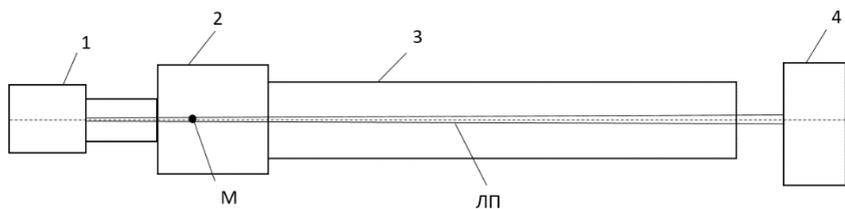


Рис. 1. Схема ускорения микротел лазерным излучением трубчатой конфигурации за счет испарения поверхности; 1 – лазер; 2 – инжектор микротел; 3 – вакуумная камера; 4 – коллектор; М – ускоренное тело; ЛП – лазерный пучок.

В одном из расчетных вариантов конечная скорость тела, полученная в результате до ускорения, составит 1400 м/с. Необходимо отметить наличие колебаний тела в поперечном направлении на всей протяженности движения шара. Потеря устойчивости, вызванная снижением фокусирующего воздействия, достигается на расстоянии -200 м.

В процессе расчетов установлено, что усиление процесса ускорения с сохранением фокусировки можно достичь, используя определенную конфигурацию плотности потока энергии. Во втором варианте начальная скорость шара выбрана равной 500 м/с (на рис. 2 представлена соответствующая рассмотренному случаю зависимость продольной скорости от расстояния), максимальная скорость шара  $v_z$  составит 3000 м/с. При этом максимальная начальная расходимость ускоряемых тел составит  $10^{-2}$ , что уже может представлять практический интерес для ускорения сферических объектов в условиях, моделирующих стойкость космических аппаратов по отношению к воздействию космической пыли и мусора.

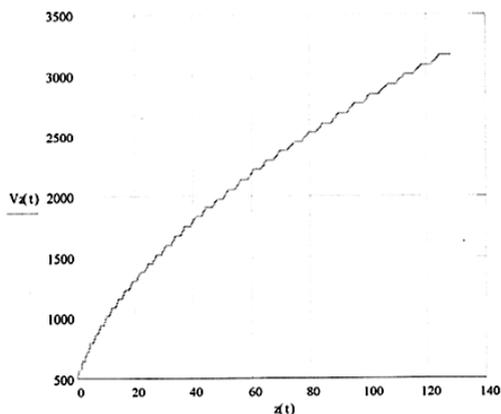


Рис. 2. Зависимость продольной скорости шара диаметром 2 см в световом потоке.

А.В. ЗИЯТДИНОВА<sup>1</sup>, П.А. ФЕДИН<sup>1,2</sup>, А.А. НИКИТИН<sup>1,2</sup>,  
С.В. РОГОЖКИН<sup>1,2</sup>, Т.В. КУЛЕВОЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ Курчатовский институт – ИТЭФ, Москва, Россия,

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБЕГОВ ИОНОВ В МАТЕРИАЛЕ МИШЕНИ ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ BELA

Для проведения имитационных экспериментов на пучках ионов, моделирующих радиационные эффекты в реакторных материалах в условиях эксплуатации, необходимо проводить не только облучение собственными ионами, создающее радиационные дефекты в материале, но и внедрять ионы газов (в основном, гелия и водорода), возникающих при реакторном облучении в результате трансмутаций. Для реализации имитационных экспериментов с использованием облучения двумя пучками ионов на инжекторном комплексе ускорителя BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator) необходимо определить энергию и угол облучения пучка ионов легких газовых ионов, которые будут имплантироваться область радиационных повреждений, создаваемых при облучении мишени тяжелоионным пучком, летящим по нормали. Глубина имплантации определяется сортом частиц, иницирующих повреждения. Для пучка ионов железа с энергией 3.2 МэВ, зона имплантации находится на глубине 300-800 нм. Проведено моделирование пробегов ионов гелия и водорода в материале мишени из железа в диапазоне энергий от 150 кэВ до 600 кэВ под углом к нормали от 0° до 65°. Определен диапазон энергий и углов облучения для ионов водорода и гелия для имплантации в зону дефектообразования.

A. V. ZIATDINOVA<sup>1</sup>, P. A. FEDIN<sup>1,2</sup>, A. A. NIKITIN<sup>1,2</sup>,  
S. V. ROGOZHNIKIN<sup>1,2</sup>, T. V. KULEVOY<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> NRC Kurchatov institute – ITEP, Moscow, Russia,

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SIMULATION OF IONS TRANSPORT IN MATTER FOR INJECTION COMPLEX OF BELA

Simulation experiments with double irradiation simulate radiation effects of reactor materials in operating conditions. It requires not only production of damages but implantations of transmutation born ions (generally hydrogen and helium) into these damages. Implementation of experiments is planned on injection complex of BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator). Basic chemical element of reactor material (iron) is accelerated. Iron ion beam ( $\text{Fe}^{10+}$  at 3.2 MeV) will normally irradiates a target and initiates damages. Light ions ( $\text{H}^+/\text{He}^+$ ) will be implanted into the damages

simultaneously. Implantation depth for hydrogen and helium ions is 300-800 nm. Simulation of ions transport in matter for energy range from 150 keV to 600 keV and irradiation angle range from 0° to 60° is carried out. Helium and hydrogen energy range and angle range for implantation to the damages are defined.

Имитационные эксперименты по облучению тяжелоионными пучками конструкционных материалов, которые моделируют повреждения, вызываемые нейтронным облучением, востребованы в качестве экспресс-анализа радиационной стойкости материалов перед облучением в реакторах. Одновременное создание радиационных повреждений пучками собственных ионов материала и имплантация ионов гелия/водорода позволит моделировать процессы накопления газовых продуктов ядерных реакций в реакторных материалах в условиях их эксплуатации.

Исследования радиационных эффектов в имитационных экспериментах проводят в промежуточной области между поверхностью облучаемого образца и на достаточном удалении от области внедрения ионов. Облучение по нормали к мишени пучком ионов железа  $Fe^{10+}$  с энергией 3,2 МэВ определяет область имплантации ионов гелия и водорода на глубине 300-800 нм. На глубину распределения остановленных ионов гелия и водорода влияют два параметра ионов, которые мы можем варьировать – энергия и угол облучения. В пакете программ SRIM/TRIM проведено моделирование пробегов ионов с фиксированным значением угла облучения от 0° до 65° при переменном значении энергии пучка ионов от 150 кэВ до 600 кэВ, и, наоборот, при фиксированном значении энергии и при переменном значении угла облучения. В результате получены распределения остановленных ионов гелия и водорода для различных вариантов значения угла облучения и энергии в материале мишени. Анализ полученных данных показал, что глубина пика остановленных ионов водорода более чувствительна к изменению энергии, чем водород; глубиной имплантации ионов гелия возможно управлять лишь в достаточно малых диапазонах, что связано с ограничениями ускоряющего напряжения; при постоянной энергии и переменном угле облучения, изменение глубины остановки ионов (для гелия и водорода) сопоставимо.

Для проведения имитационных экспериментов с использованием двойного облучения пучком тяжелых ионов  $Fe^{10+}$  с энергией 3,2 МэВ и пучком легких ионов  $H^+/He^+$ , угол облучения мишени пучками легких ионов должен лежать в пределах от 45° до 60°. Требуемая энергия ионов гелия – 200-600 кэВ, энергия ионов водорода – 150-220 кэВ.

A.A. САВЧЕНКО<sup>1,2</sup>, В. ВАГНЕР<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

## **НЕДИПОЛЬНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОСЕВОМ КАНАЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ГЭВНЫМИ ЭНЕРГИЯМИ**

Мы продолжили наше исследование недипольности каналированного излучения при ГэВных энергиях пучков [1], так как данный эффект существенно влияет на спектр и интенсивность каналированного излучения [2]. Экспериментальное доказательство того, что каналированное излучение и когерентное тормозное излучения влияют на выход позитронов при преобразовании гамма-квантов в электро-позитронные пары в кристаллической мишени, было сделано на установке КЕК В [3]. Продвинутый концепт интенсивного позитронного источника, так называемый гибридный источник был предложен много лет назад [4]. Мотивированные проектами CLIC и ILC активные дискуссии этого концепта остаются актуальными и по сей день [5-7].

Помимо деканализирования [8, 9], нельзя пренебрегать недипольностью каналированного излучения при ГэВных энергиях пучков в реалистичном моделировании спектра излучения [10], что является отправной точкой для любых вычислений производства позитронов путем преобразования излучения в пары [5].

Мы впервые обсуждаем недипольность излучения при осевом каналировании электронного пучка с энергией в несколько ГэВ, проводя основанное на реалистичном осевом непрерывном потенциале моделирование.

A.A. SAVCHENKO<sup>1,2</sup>, W. WAGNER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRNU MEPhI, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

## **NON-DIPOLARITY OF AXIAL CHANNELING RADIATION AT GEV ELECTRON BEAM ENERGIES**

We continued our investigation of the non-dipolarity of channeling radiation (CR) at GeV beam energies [1] which remarkably change the CR spectrum and its intensity [2]. The experimental proof that CR and coherent bremsstrahlung (CB) substantially influence the output of positrons at conversion of  $\gamma$ -radiation into  $e^+e^-$  pairs in crystalline targets has been given at the KEK B facility [3]. An advanced concept to create a non-conventional intense positron source, the so-called hybrid setup, has been suggested long time ago [4]. Motivated by the pending CLIC and ILC projects, active discussions of this concept did not drop and stay actual up to now [5,6,7].

Besides de-channeling [8,9], the non-dipolarity of CR at GeV beam energies cannot be neglected in realistic simulations of CR spectra [10] being the initial point for any evaluation of positron production via conversion of  $\gamma$ -radiation into  $e^+e^-$  pairs [5].

We for the first time consider the non-dipolarity of axial CR at electron beam energy of several GeV carrying out simulations based on realistic axial continuous potentials.

*Список литературы*

- [1] B. Azadegan and W. Wagner, “Non-dipolarity of channeling radiation at GeV beam energies”, 7th Int. Conf. “Channeling 2016”, Sirmione, Italy, Nucl. Instrum. Methods B 402 (2017) 63.
- [2] N. F. Shul’ga, L. É. Gendenshtein, I. I. Miroshnichenko et al. , Sov. Phys. JETP 55(1) (1982) 30 (and Refs. therein)
- [3] T. Suwada, M. Satoh, K. Furukawa et al. , Phys. Rev. Spec. Topics – Accelerators and Beams 10 (2007) 073501 (and Refs. therein)
- [4] R. Chehab, F. Couchot, A. R. Nyaiesh et al. , Proc. IEEE PAC’89, Chicago, IL, USA, 1989, p. 283.
- [5] B. Azadegan, S. A. Mahdipour and W. Wagner, “Simulation of positron energy spectra generated by channeling radiation of GeV electrons in a tungsten single crystal”, Journal of Physics: Conf. Series 517 (2014) 012039.
- [6] A. Potylitsyn et al. , “Undulator-based and crystal-based gamma radiation sources for positron generation”, Journal of Physics: Conf. Series 517 (2014) 012041.
- [7] I. Chaikovska, R. Chehab et al. , „Optimization of a hybrid positron source using channeling“, Nucl. Instrum. Methods B 402 (2017) 58 (and Refs. therein)
- [8] H. Backe et al. , Nucl. Instrum. Methods B 266 (2008) 3835.
- [9] O. V. Bogdanov and S. B. Dabagov, Journal of Physics: Conf. Series 357 (2012) 012029.
- [10] B. Azadegan and W. Wagner, Nucl. Instrum. Methods B 342 (2015) 144.

И. АДАМ, А.А. БАЛДИН, А.И. БЕРЛЕВ, Н.И. ЗАМЯТИН,  
И.И. МАРЬИН, М. ПАРАЙПАН, А.А. СОЛНЫШКИН,  
В.И. СТЕГАЙЛОВ, С.И. ТЮТЮННИКОВ, И.П.ЮДИН

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна Московской обл., Россия*

## **ОБЛУЧЕНИЕ УРАНОВОЙ МИШЕНИ «КВИНТА» НА ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКАХ УСКОРИТЕЛЯ ОИЯИ**

В докладе приведены результаты экспериментов по облучению урановой мишени «Квинта» на выведенных пучках ускорителя-нуклотрона (ОИЯИ, Дубна) в коллаборации «Энергия+трансмутация». Проведены исследования глубоких подкритических электронно-ядерных систем и возможности их применения для производства энергии и трансмутации радиоактивных отходов. Приведена схема экспериментов, а также новые полученные результаты.

J. ADAM, A.A. BALDIN, A.I. BERLEV, N.I. ZAMYATIN,  
I.I. MAR'IN, M. PARAIPAN, A.A. SOLNYSHKIN, V.I. STEGAILOV,  
S.I. TYUTYUNNIKOV, I.P. YUDIN

*Joint Institute for Nuclear Research, (Dubna, Moscow region), Russia*

## **IRRADIATION OF THE “QUINTA” URANIUM TARGET ON THE OUTPUT BEAMS FROM THE ACCELERATOR OF JINR**

Our report shows the results of experiments on irradiation of the “Quinta” uranium target on the output beams from the Nuclotron accelerator (JINR, Dubna) in the “Energy+Transmutation” collaboration. The investigation of deep subcritical electronuclear systems and feasibility of their application for energy production and radioactive waste transmutation, was conducted. The scheme of experiments is given, as well as the results obtained.

В ЛФВЭ ОИЯИ на протяжении последних лет ведутся активные работы по созданию подкритических ядерных источников нейтронов на базе покритичной установки “Квинта” и релятивистских пучков тяжелых ионов, ускоренных на нуклотроне ЛФВЭ ОИЯИ до энергий 8 ГэВ/нуклон.

В обычном ядерном реакторе атомной электростанции используется обогащенный уран  $U^{235}$ , получаемый из природного урана, в составе которого 99,3 %  $U^{238}$  и 0,7 %  $U^{235}$ . В таком реакторе используется цепная реакция деления  $U^{235}$ , в которой выделяется энергия, трансформирующаяся в тепловую и затем в электрическую.

Второй способ получения энергии в современной ядерной энергетике – это разрабатываемые классические электроядерные энергетические схемы (ADS – Accelerator Driven Systems), которые представляют собой

подкритический быстрый реактор с внешним источником нейтронов. Стартовая подкритичность активной зоны находится в диапазоне  $k_{эфф} \sim 0,97 \div 0,98$  и обеспечивается «запальным» ураном-235. В результате спектр нейтронов в активной зоне (АЗ) ADS-установок формируется, также как и в обычном реакторе, в основном нейтронами спектра деления.

Анализ показывает существенную ограниченность возможностей традиционных реакторных и классических ADS-системах, основанных на использовании нейтронов спектра деления, - в решении ключевых проблем современной атомной энергетики:

Это 1) проблема утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и 2) проблема вовлечения запасов отвалного ( $^{238}\text{U}$ ) урана и тория в производство энергии.

На сегодняшний день перспективой кардинального решения проблем современной атомной энергетики представляется использование существенно более жесткого, чем делительный, спектра нейтронов.

Для практической реализации этого пути предлагается принципиально новая схема электроядерного метода, основанная на ядерных релятивистских технологиях (ЯРТ).

Схема ЯРТ нацелена на использование максимально жесткого нейтронного спектра, формируемого пучками релятивистских частиц в глубоко подкритичной квазибесконечной (обеспечивающей минимальную утечку нейтронов), активной зоне. С этой целью в ОИЯИ программа исследований основывается на использовании мишени из природного урана (с коэффициентом размножения нейтронов  $K=0.36$ ). В докладе приведена схема проведения экспериментов, а также полученные новые результаты. Показаны энергетическое и пространственное распределения нейтронов в сборке «Квинте». Показано, что развитие и применение ЯРТ может быть перспективным для решения проблемы утилизации отработанного ядерного топлива и глобальных задач энергетики. Теоретические расчеты, проведенные с помощью разных модельных представлений в определенной мере подтверждают полученные нами результаты.

#### *Список литературы*

- [1] Балдин А.А., Вишневский А.В., Тютюнников С.И., Юдин И.П. и др. //В Сборнике материалов (Конференция ЛаПлаз, МИФИ, 30 января - 1 февраля 2018), Москва, 2018.

П.А. БЫСТРОВ, Ю.С. ПАВЛОВ

*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва,  
Россия*

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ДОЗ МЕТОДОМ СЕТОК ДЛЯ ОБЛУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ**

Представлены уравнения распространения электронного пучка в веществе для расчета доз облучения в объектах методом сеточных функций, который является альтернативой методу Монте-Карло. Уравнения предполагают построение разностных схем для расчета равновесной сеточной функции распределения электронного пучка. Предложена одномерная модель.

P.A. BYSTROV, Y.S. PAVLOV

*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of Russian Academy of  
Sciences (IPCE RAS), Moscow, Russia*

## **THEORETICAL BASICS OF DEVELOPING THE ALGORITHM FOR CALCULATION OF DOSES IN OBJECTS IRRADIATED BY ACCELERATOR USING GRID METHODS**

Presented are the equations of electron beam propagation in a substance for calculating radiation doses in objects by the method of grid functions, which is an alternative to the Monte Carlo method. The equations involve the construction of finite-difference schemes for the calculation of the equilibrium grid distribution function of the electron beam. A one-dimensional model is proposed.

Для расчетов доз облучения объектов, облучаемых ускорителями, наиболее часто пользуются методом Монте-Карло. Однако в ряде приложений пучок задается таким образом, что эффективнее использовать сеточные методы для расчета эволюции заданной функции распределения пучка. Для этого необходимо преобразовывать функцию распределения, чтобы обеспечить расчеты методом Монте-Карло.

Сеточные методы применяются реже, поскольку предполагают проведение расчета интегро-дифференциального кинетического уравнения в конечных разностях, что является трудной задачей вычислительной математики, предъявляющей высокие требования к ЭВМ. Конечно-разностные методы предполагают использование мощных кластеров ЭВМ для проведения параллельных вычислений [1]. Мощная ЭВМ требуется для проведения расчетов семимерной функции

распределения пучка (зависящей от координат положения, координат импульса и времени).

Распространение пучка в системе развертки описывается кинетическим уравнением для релятивистского пучка в магнитном поле, заданном вектором индукции  $\vec{B}_{ext}$ , для не зависящей от времени функции распределения может быть записано в общем виде:

$$\frac{\vec{p}}{m_0} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} - e \left( \left[ \frac{\vec{p}}{\gamma m_0}, (\vec{B}_{ext} + \vec{B}_{beam}) \right] + \vec{E}_{beam} \right) \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = St(\vec{r}, \vec{p}, \gamma, \dots)$$

где  $-e$  - заряд электрона,  $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$  - релятивистский фактор,  $m_0$  - масса покоя электрона,  $\vec{B}_{beam}$  и  $\vec{E}_{beam}$  - поля, создаваемые пучком,  $\vec{v} = \vec{p}/m$  - вектор скорости электрона,  $\vec{p}$  - импульс электрона,  $\vec{r}$  - радиус вектор положения электрона,  $St$  - интеграл столкновений. Прохождение электронов в слое вещества рассчитывается путем определения интеграла столкновений, строящегося на основе функций распределения по энергии и углу рассеяния электронов. Особенность расчетов состоит в том, что столкновения электронов с веществом приводят к потере энергии, переход электронов на более высокие энергии не возможен. Поэтому равновесное состояние, при котором интеграл столкновений равен нулю, не достигается.

Расчет распределения дозы облучения выполняется после нахождения функции распределения стационарного состояния путем нахождения из нее функций распределения потока энергии и его дивергенции [3]. Поскольку решение семимерной задачи требует трудоемких вычислительных расчетов, в работе рассматривается одномерная модель облучения.

#### *Список литературы*

- [1] Клосс Ю. Ю., Мартынов Д. В. Решение кинетического уравнения Больцмана с помощью тетраэдрических сеток на кластерной архитектуре / Вычислительные методы и программирование. — 2012. — т 13. — выпуск 3. — с. 90–96
- [2] Bystrov P. A., Pavlov Yu. S., Prokopenko A. V. et al. Computer program "BEAM SCANNING" for calculation of irradiation processes in radiation-technological installations / Procedia Computer Science. — Elsevier B.V., Amsterdam, the Netherlands. — 2018. — Vol. 145. — P. 123–133.
- [3] Rossi H. H., Roesch W. C. Field Equations in Dosimetry / Radiation Research. — 1962. — N 16. — P. 783-795.

Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА, Р.О. ГАВРИЛИН, П.А. ФЕДИН,  
А.О. ХУРЧИЕВ, Р.П. КУЙБИДА, А.В. КАНЦЫРЕВ,  
С.А. ВЫСОЦКИЙ., Т.В. КУЛЕВОЙ

*Институт Теоретической и Экспериментальной Физики НИЦ «Курчатовский  
Институт», Москва, Россия*

## **РАСЧЁТ ДИНАМИКИ ПУЧКА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА УСКОРИТЕЛЕ ТИПР-1**

На основании моделирования динамики пучка разработана конструкция канала транспортировки пучка на ускорителе ТИПр-1 с энергией до 100 кэВ/нуклон для исследования процессов торможения тяжелых ионов в веществе. Проведена работа по настройке вакуумной системы, что позволило определить параметры диафрагм на входе и выходе плазменной мишени. Проведены тестовые испытания с использованием полученных результатов.

E.R. KHABIBULLINA, R.O. GAVRILIN, P.A. FEDIN,  
A.O. KHURCHIEV, R.P. KUIBEDA, A.V. KANTSYREV,  
S.A. VISOTSKI, T.V. KULEVOY

*Institute for Theoretical and Experimental Physics NRC "Kurchatov Institute",  
Moscow, Russia*

## **BEAM DYNAMIC SIMULATION IN THE EXPERIMENTAL SETUP FOR PLASMA INVESTIGATION ON TИPR-1**

The design of the beam transport channel for performing experiments to determine the energy losses in plasma was developed based on the beam dynamics simulation. Work on the matching of vacuum system was carried out, which allowed determining the parameters of the diaphragms at the entrance and exit of the plasma target. According to the obtained results, the first successful tests on the ИПр-1 were held.

В ИТЭФ на ускорителе ТИПр-1 (Тяжелоионный Прототип) ведутся работы по созданию экспериментальной установки для измерения тормозных потерь многозарядных тяжёлых ионов низкой энергии в газоразрядной плазме [1, 2]. Ускоритель ТИПр-1 [3] с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), работающий на частоте 27,7 МГц, обеспечивает ускорение ионов до 100 кэВ/нуклон. Вакуумно-дуговой источник ионов металлов предназначен для генерации пучков ионов от  $C^+$  до  $U^{4+}$  [4]. Для экспериментов по измерению тормозных потерь ионов в ионизированном веществе используется высокоточная газоразрядная плазменная мишень, разработанная в ИТЭФ (рис.1) [5]. Плотность свободных электронов в мишени может составлять до  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  при температуре до 2 эВ. Проведена работа по настройке

вакуумной системы, что позволило определить параметры диафрагм на входе и выходе плазменной мишени. Проведено моделирование динамики пучка на плазменную мишень, по результатам которого определены параметры магнитных квадрупольных линз и их положение в транспортном канале для обеспечения максимально возможной интенсивности пучка после прохождения диафрагм.

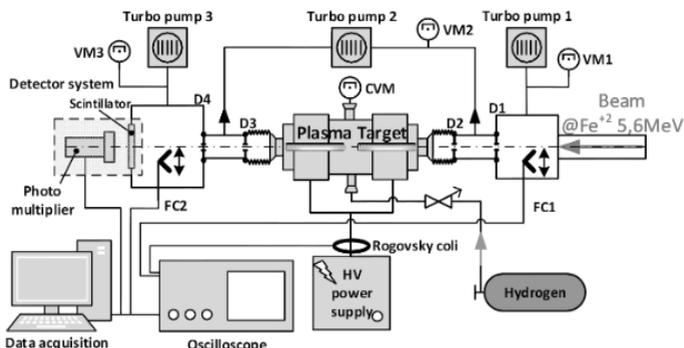


Рис. 1. Вакуумная система и система диагностики, D1-4 – диафрагмы  $\varnothing = 1-3$  мм, VM1-3 – вакууметры, CVM вакууметр на разрядной камере, FC1, 2 – Цилиндры Фарадея

Измерение энергетических потерь ионов в веществе проводилось с помощью времяпролетного метода [6]. Этот метод основан на определении изменения фазы (временной задержки) каждого ионного импульса относительно начального положения во временном интервале. Для наблюдения временной структуры микробанчей использовался фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) Hamamatsu R760 и быстрый  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -сапфировый сцинтиллятор.

#### Список литературы

- [1] R.O. Gavrilin and others// Rep. GSI-2016-2. 2017, P. 18.
- [2] C. Deutsch and others// The Open Plasm.Phys.Journ. 2010. Vol. 147, № 3, P. 88–115
- [3] T.V. Kulevoy and others// Proc. Int. Top. Meeting on Nuc. Res. App. and Util. of Accel. 2009, P. 1-8.
- [4] D. Kashinsky and others// EPAC-2000. Proc. 2005., P. 854-856
- [5] A.Fertman and others// Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res, 2006, Vol 247/2 P. 199-204
- [6] R.O. Gavrilin and others// Rep. GSI-2018-2. 2018, P. 34.

М.М.КАЦ

*Институт Теоретической и Экспериментальной Физики НИЦ «Курчатовский  
Институт», Москва, Россия*

## **СРАВНЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ РАКА**

Для сравнения разного оборудования и разных процедур облучения предлагается использовать расчетное отношение интеграла биологической дозы ( $BD=dE/dx \cdot ОБЭ$ , ОБЭ относительная биологическая эффективность) внутри объема мишени к интегралу биологической дозы по всему объему тела пациента при учете зависимостей действия облучения от биологической дозы и зависимости  $ОБЭ=f(dE/dx)$ . Современные измерения ОБЭ недостаточно точны для их использования при планировании облучения. Но такие расчеты для водного фантома и для одинаковых по форме, размерам и глубине мишеней позволяют сравнивать разные технологии облучения.

М.М.KATS

*Institute for Theoretical and Experimental Physics NRC "Kurchatov Institute", Mos-  
cow, Russia*

## **COMPARISON OF EQUIPMENT FOR TREATMENT CANCER BY IRRADIATION**

It is suggested to use for comparison of different equipment and different procedures of irradiation calculation relations of integral of biological dose ( $BD=dE/dx \cdot RBE$ ) into a volume of cancer target to integral of biological dose into of all volume of patient body at take into account both dependant of biological interaction on biological doses and dependant of RBE on  $dE/dx$ . Modern measurements of RBE have not enough precision for use them at treatment planning. But such calculations for water phantom and for targets with the same shape, sizes and deeps permit compare of different technology of irradiation.

П.А.ФЕДИН<sup>1,2,3</sup>, К.Е.ПРЯНИШНИКОВ<sup>1</sup>, Р.П.КУЙБИДА<sup>1,3</sup>,  
А.А.НИКИТИН<sup>1,2</sup>, Н.П.БОБЫРЬ<sup>3</sup>, С.В.РОГОЖКИН<sup>1,2</sup>,  
Т.В.КУЛЕВОЙ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>3</sup>НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

## **ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СПЛАВА W-5RE ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЯЖЕЛО-ИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР**

Вольфрам является обращенным к плазме материалом в разрабатываемых термоядерных установках для защиты вакуумной камеры от потоков плазмы и нейтронов. Для исследования влияния нейтронного облучения на вольфрам используется метод экспресс-моделирования с использованием пучков тяжелых ионов. Такие эксперименты ведутся в НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ на ускорителе тяжелых ионов (ТИПр). Облученные образцы анализируются с помощью просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии. Представлены результаты ПЭМ-анализа сплава W-5Re, облученного ионами Fe<sup>2+</sup> с энергией 5,6 МэВ при комнатной температуре до дозы 8 сна.

P.A.FEDIN<sup>1,2,3</sup>, K.E.PRIANISHNIKOV<sup>1</sup>, R.P.KUIBEDA<sup>1,3</sup>,  
A.A.NIKITIN<sup>1,2</sup>, N.P.BOBYR<sup>3</sup>, S.V.ROGOZHKIN<sup>1,2</sup>,  
T.V.KULEVOY<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>NRC "Kurchatov institute" – ITEP, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

<sup>3</sup>NRC "Kurchatov institute", Moscow, Russia

## **THE FIRST RESULTS OF RADIATION STABILITY W-5RE ALLOY RESEARCH AFTER IRRADIATION ON THE HEAVY ION ACCELERATOR HIPR**

Tungsten is promising material for protection a vacuum chamber against plasma and neutron flow in designed fusion facilities. For investigation of neutron irradiation influence on tungsten, the method of express simulation by using the heavy ion beams instead is used. Such experiments are under process at the RNC "Kurchatov Institute" – ITEP at the heavy ion accelerator (HIPR). Irradiated layer of material is analyzed with transmission electron microscopy and atom probe tomography. This work represents results of microstructure analysis of W-5Re alloy irradiated by 5.6 MeV Fe<sup>2+</sup> ion beam at room temperature up to 8 dpa.

Испытание радиационной стойкости материалов в исследовательских реакторах связано со значительной длительностью проводимых экспериментов и сложностью обращения с активированными реакторным облучением материалами. Облучение ионными пучками может быть

использовано для обеспечения предварительного экспресс-анализа и позволяет изучать механизмы возникновения радиационных дефектов в материале. При этом ионное облучение не активирует материалы и позволяет набирать дозы радиационных повреждений в кратчайшие сроки. В НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ на тяжело-ионном ускорителе ТИПр отработана методика облучения в импульсном режиме пучком ионов  $Fe^{2+}$  с энергией 5,6 МэВ с током 300 мкА при температуре образцов до 700°C[1]. Дальнейшее исследование изменений микроструктуры образца проводится методами просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии (АТМ). Учитывая, что реакторное облучение приводит к образованию значительного количества рения, в настоящей работе проведено моделирование стабильности твердого раствора сплава W-5Re под облучением  $Fe^{2+}$  при комнатной температуре до дозы радиационных повреждений 8 сна. Экспериментальные образцы диаметром 3 мм были изготовлены из монокристаллического сплава W-5Re, полученного методом электронно-лучевой плавки в вакууме. Исследования поврежденного ионами слоя материала показали, что в результате облучения образуются дефекты микроструктуры в виде дислокационных петель и кластеров точечных дефектов, дающих контраст в виде черных точек (см. рис 1). Характерные размеры данных особенностей составляют менее 10 нм. Для анализа степени однородности твердого раствора сплава был проведен анализ материала методами АТМ. Материал извлекался в области ионных повреждений с глубины 500 нм от облученной поверхности.

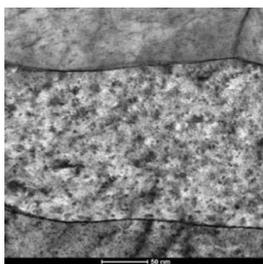


Рис. 1. Микроструктура сплава W-5Re в области повреждений ионами  $Fe^{2+}$

*Список литературы*

- [1] Fedin P.A. and others// 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1115 032026

К.И. КОЗЛОВСКИЙ<sup>1</sup>, Е.Д. ВОВЧЕНКО<sup>1</sup>, М.И. ЛИСОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
В.И. РАЩИКОВ<sup>1</sup>, А.Е. ШИКАНОВ<sup>1</sup>, Е.А. ШИКАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ

<sup>2</sup>Спецавтоинжиниринг, Москва, РФ

## **ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ**

Предложен импульсный генератор высокого напряжения для получения коротких пакетов электронов длительностью ~10 нс, ускоряемых в вакуумных диодных системах до энергий превышающей 0.5 МэВ. Приведены результаты предварительного испытания прибора. Обсуждаются возможности его использования при коллективном ускорении дейтронов в прямых импульсных электронных потоках.

K.I. KOZLOWSKI<sup>1</sup>, E.D. VOVCHENKO<sup>1</sup>, M.I. LISOVSKI<sup>1</sup>,  
V.I. RASHCHIKOV<sup>1</sup>, A.E. SHIKANOV<sup>1</sup>, E.A. SHIKANOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Specavtoengineering, Moscow, Russia

## **HIGH-VOLTAGE GENERATOR FOR PRODUCTION OF SHORT PULSE ELECTRON FLUXES**

High-voltage pulse generator to produce short electron bunches ~10 ns duration, accelerated in vacuum diode systems to energy above 0.5 MeV is suggested. Results of devise preliminary testing are presented. The possibility to use this devise for deuteron collective-field acceleration in straight pulse electrons flows is discussed.

В работе [1] был исследован процесс ускорения дейтронов из лазерной плазмы импульсным электронным потоком с последующей генерацией нейтронов при их взаимодействии с твердыми мишенями, содержащими изотопы тяжелого водорода. При этом оказалось возможным эффективно осуществлять помимо традиционных ядерных реакций  $T(d, n)^4He$  и  $D(d, n)^3He$ , ядерные реакции  $^9Be(d, n)^{10}B$ ,  $^7Li(d, n)^2^4He$ ,  $^7Li(d, n)^8Be$ ,  $^{12}C(d, n)^{13}N$ . Это существенно расширяет технологические и эксплуатационные возможности нейтронных генераторов, за счет реализации схемы коллективного ускорения дейтронов.

В данном нейтронном генераторе в качестве импульсного источника напряжения для ускорения электронов использовалась линия Блюмляйна, характеризующаяся достаточно большими габаритами и весом. Авторами была предпринята попытка замены ее импульсным трансформатором «Тесла», конструкция которого представлена на рис.1. Подобная идея

была ранее использована при создании малогабаритного импульсного генератора рентгеновских квантов [2].

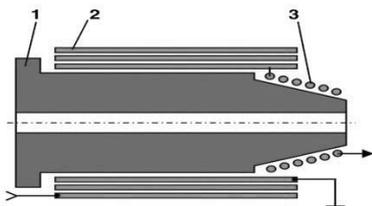


Рис. 1. Схематический разрез высоковольтного импульсного трансформатора:

1 - изолятор, 2 - первичная обмотка, 3 - вторичная обмотка.

Первичная обмотка трансформатора имела ленточную структуру и состояла из 1 – 3 витков, изолированных друг от друга и соединялась с через разрядник- коммутатор с накопительной емкостью  $C_1$ . Вторичная обмотка выполнялась в виде катушки конической формы, соединенной с емкостью  $C_2$  и разрядником-обострителем. Соотношение числа витков выбиралось на основе условия согласования:  $C_1 L_1 \approx C_2 L_2$ , где  $L_{1,2}$  – индуктивности первичной и вторичной обмоток.

При срабатывании управляемого коммутатора на первичную обмотку разряжалась накопительная емкость с запасенной энергией до 15Дж. Вторичная обмотка соединялась через разрядник – обостритель с вакуумным диодом, на котором формировался импульс напряжения с амплитудой  $\approx 0.5$  МВ и длительностью  $\approx 10$  нс на полувывоте. Компьютерный расчет показал, что для рассматриваемой диодной системы ему может соответствовать ток с амплитудой до 10 кА. Из данных работы [1] следует, что при таких параметрах пакета ускоренных электронов возможно эффективное ускорение дейтронов до энергий необходимых для генерации нейтронов с использованием ядерных реакций, указанных выше.

Данная работа выполнена в рамках соглашения №14.575.21.0169 о предоставлении субсидии Минобрнауки РФ.

#### *Список литературы*

- [1] Козловский К.И., Рыжков В.И., Цыбин А.С., Шиканов А.Е. Атомная энергия, т. 113, вып.3, 2012, с.120-122.
- [2] Мягков Б.А., Шиканов А.Е., Шиканов Е.А. Атомная энергия, т. 106, вып.2, 2009, с.57-62.

Б.Ю. БОГДАНОВИЧ<sup>1</sup>, М.С. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, Ю.Ф. ЖУЙКОВ<sup>2</sup>,  
А.П. КЛАЧКОВ<sup>1</sup>, А.Д. КОЛЯСКИН<sup>1</sup>, А.В. НЕСТЕРОВИЧ<sup>1</sup>,  
А.Г. ПОНОМАРЕНКО<sup>1</sup>, А.Е. ШИКАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ

<sup>2</sup>Институт геофизических и радиационных технологий ИАН ВШ, Москва, РФ

## **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ДЕБИТА СКВАЖИНЫ С ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТЬЮ**

Предложена технология повышения проницаемости призабойной зоны скважины (ПЗС) с высоковязкой нефтью с использованием электродинамического нагревателя обсадной трубы. Показано, что он позволяет за счет ее локального нагрева существенно увеличить температуру ПЗС и связанную с распределением температурного поля вязкость нефти.

B.YU. BOGDANOVICH<sup>1</sup>, M.S. DMITRIEV<sup>1</sup>, YU.F. ZHUYIKOV<sup>2</sup>,  
A.D.KOLYASKIN<sup>1</sup>, A.P.KLACHKOV<sup>1</sup>, A.V. NESTEROVICH<sup>1</sup>,  
A.G. PONOMARENKO<sup>1</sup>, A.E. SHIKANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, RF

<sup>2</sup>Institute for Geophysical and Radiation Technology of IAS HE, Moscow, RF

## **ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGY FOR INCREASING WELL DEFIT WITH HIGH-VISCOSITY OIL**

A technology is proposed to increase the permeability of the bottomhole zone of a well (BZW) with high-viscosity oil using an electrodynamic casing heater. It is shown that it allows, due to its local heating, to significantly increase the BZW temperature and reduce viscosity of oil.

В работе [1] предложена технология повышения дебита скважин с высоковязкой нефтью за счет термо- акустического воздействия на пласт. Ее перспективность обусловлена тем, что одним из главных технологических и аппаратурных элементов, является индукционный высокочастотный нагреватель обсадной трубы скважины (ОТС). В отличие от скважинного электрического нагревателя с прямым накалом термoeлементa [2] в данном случае источником тепла является непосредственно участок обсадной трубы, где локально возбуждается электрический ток. При этом значительная часть выделяемой в нем тепловой энергии попадает в зону пласта и способствует его нагреву. В работе [3] излагается описание такого нагревателя, принцип действия,

результаты исследования и испытаний. Схема его применения в промышленных условиях поясняется на рисунке.

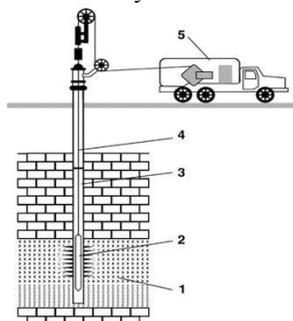


Рис. 1. Общий вид комплекса для повышения проницаемости ПЗС:

- 1- пласт с продуктивным флюидом;
- 2- скважинный электродинамический нагреватель;
- 3- скважина, обсаженная металлической трубой;
- 4- геофизический грузонесущий кабель;
- 5- наземная геофизическая станция с источником питания, пультом управления и лебедкой

Он представляет собой соленоид с ферритовым сердечником, соединенный с источником переменного напряжения ультразвуковой частоты, располагаемый соосно с ОТС в области ее перфорации. При нагреве участка трубы токами, индуцируемыми в ОТС, осуществляется формирование температурного поля в ПЗС. Путем компьютерного моделирования процесса авторами была установлена, с использованием уравнения Рейнольса- Филонова, следующая полуэмпирическая формула для поля кинематической вязкости нефти в области ПЗС:

$$\eta(P, D, r) \approx A \exp\left(-\frac{B}{r^k} \frac{P}{Ck + D}\right),$$

где  $r$ - текущая радиальная координата точки в ПЗС,  $D$ - дебит скважины,  $P$ - мощность питания нагревателя. Неизвестные коэффициенты в формуле рассчитывались методом наименьших квадратов. Расчет показал, что понижение  $\eta$  до значений соответствующих обычной нефти можно обеспечить при  $P \sim \text{кВт}$ .

Данная работа выполнена в рамках соглашения №15-19-00151 о предоставлении гранта РНФ.

#### Список литературы

- [1] Богданович Б.Ю., Ильинский А.В., Нестерович А.Ю. и др. Патент РФ №2631451, от 29.07.2016 г.
- [2] Булатов А.И., Кусов Г.В., Савенок О.В.. Асфальто-смоло-парафиновые отложения и гидратообразования: Предупреждение и удаление. Учебное пособие в 2 томах, Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2011 г.
- [3] Клачков А.П., Пономаренко А.Г. Погружной преобразователь для электропитания системы теплового и ультразвукового воздействия на призабойную зону пласта. Ядерная физика и инжиниринг, принято в печать.

А.Н. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, Н.С. ШИШКИНА<sup>1</sup>, О.В. КАРАСТОЯНОВА<sup>1</sup>,  
Н.И. ФЕДЯНИНА<sup>1</sup>, М.Т. ЛЕВШЕНКО<sup>1</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>ВНИИТеК – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН,  
Видное, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия

## **РАДИАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДИЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ ПЛОДОВООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ**

В работе исследовались вопросы применения радиационной обработки ускоренными электронами плодоовощной продукции с целью оптимизации технологии холодильного хранения. Облучение подготовленных корнеплодов и плодовых овощей выполнялось на ускорителе электронов с энергией до 10 МэВ дозой 3 кГр. Облученные образцы помещались на холодильное хранение срок до 20 суток. Качество сырья при хранении оценивалось по изменению органолептических и химико-технологических показателей. Также при холодильном хранении изучалось изменение фитопатогенной микрофлоры.

A.N. PETROV<sup>1</sup>, N.S. SHISHKINA<sup>1</sup>, O.V. KARASTAYANOVA<sup>1</sup>,  
N.I. FEDIANINA<sup>1</sup>, M.T. LEVSHENKO<sup>1</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>VNIITek - branch of the FGBNU «FNTS food systems. V.M. Gorbатов» RAS,  
Vidnoye, Moscow region, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Russia

## **RADIATION TREATMENT BY ACCELERATED ELECTRONS FOR OPTIMIZATION REFRIGERATION STORAGE TECHNOLOGY OF FRUIT AND VEGETABLE**

The paper explores the use of radiation processing by accelerated electrons of fruits and vegetables in order to optimize refrigeration storage technology. Irradiation of prepared root crops and fruit vegetables was carried out at an electron accelerator with energy up to 10 MeV with dose of 3 kGy. The irradiated samples were placed in refrigeration storage for up to 20 days. The quality of raw materials during storage was estimated by the change in organoleptic and chemical-technological parameters. The change in phytopathogenic microflora was studied during refrigerated storage.

Эффективным направлением применения ионизирующих излучений является обработка плодоовощной и другой продукции с целью обеззараживания и снижения потерь при хранении. В последние годы наметилась тенденция применения дополнительных к облучению методов

обработки. В работе проведены исследования по обоснованию структуры и режимов комплексной технологии хранения плодоовощной продукции, включающей в качестве основного фактора воздействия – обработку фруктов и овощей ускоренными электронами и дополнительных факторов – охлаждение и модифицирование состава среды.

Предварительно подготовленная плодоовощная продукция (морковь, томаты, сладкий перец) упаковывалась в полимерную пленку полиамид-полиэтилен толщиной 80 микрон. Электронное облучение выполнялось на ускорителе с энергией электронов до 10 МэВ дозой 3 кГр. Хранение упакованных овощей проводили в холодильных камерах при температуре 4-6 °С. Газовая среда в упаковках создавалась за счет дыхания овощей (поглощение O<sub>2</sub>, выделение CO<sub>2</sub>) и селективной проницаемости полимерного материала по отношению к компонентам газовой среды. Контроль состава газовой среды в упаковках проводился с использованием газоанализатора МАГ-6П-В. Качество сырья при хранении оценивали по изменению органолептических и химико-технологических показателей. Изменение микрофлоры оценивали по КМАФАнМ, количеству плесневых грибов и дрожжей, а также количеству бактерий семейства *Enterobacteriaceae*.

В результате исследований установлено, что при холодильном хранении разных овощей, подвергнутых радиационному действию в применяемых полимерных упаковках барьерного типа состав газовой среды характеризовался повышенным содержанием CO<sub>2</sub> и снижением O<sub>2</sub>, поглощаемого тканями при дыхании. Наибольшая интенсивность дыхания была отмечена при обработке и хранении корнеплодов моркови. Полученные результаты показали, что ингибирование характерной для овощей бактериальной микрофлоры в наибольшей мере проявилось при облучении и хранении в газовой среде корнеплодов. При продленных сроках хранения облученных плодовых овощей даже в условиях формируемой газовой среды отмечается некоторая степень снижения сопротивляемости инфекции. Установлено, что в результате применения радиационной обработки ионизирующими излучениями потери овощей (морковь, томаты, перец), сохраняемых в полимерных упаковках, сокращаются в 3-5 раз. Для моркови летних сортов сроки хранения при 4-5 °С увеличивались до 4 месяцев, у томатов и перца до 2-3 месяцев. Обработанные продукты сохраняли высокие органолептические показатели и у них снизились потери от убыли массы.

Ж.А. СЕМЕНОВА<sup>1</sup>, А.Ю. КОЛОКОЛОВА<sup>1</sup>, Н.В. ИЛЮХИНА<sup>1</sup>,  
М.Т. ЛЕВШЕНКО<sup>1</sup>, М.Н. КУРБАНОВА<sup>1</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>1,2</sup>,  
О.А. ШИЛОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ВНИИТек – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН,  
Видное, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия

<sup>3</sup>ООО «Теклеор»

## **ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ СВЕЖИХ ГРИБОВ ШАМПИНЬОНОВ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ**

В работе проведены исследования угнетения культуры *Salmonella spp.* на поверхности шляпок грибов шампиньона двуспорового (*Agaricus bisporus*), обработанных релятивистскими электронами в сравнении с угнетением культуры на поверхности моделей (модельных сред), также обработанными релятивистскими электронами. Облучение проводили на ускорителе УЭЛР-10-15-С-60-1 с энергией электронов 10 МэВ дозами 0,8 кГр, 1,0 кГр, 2,0 кГр и 3,0 кГр. Облученные образцы были проанализированы на определение остаточного количества выжившей микрофлоры. В результате получены количественные характеристики эффективности ингибирования культуры *Salmonella spp.* под воздействием различных доз облучения.

J.A. SEMENOVA<sup>1</sup>, A.YU. KOLOKOLOVA<sup>1</sup>, N.B. ILYUKHINA<sup>1</sup>,  
M.T. LEVSHENKO<sup>1</sup>, M.N. KURBANOVA<sup>1</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>1,2</sup>,  
O.A. SHILOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>VNIITek - branch of the FGBNU «FNIS food systems. V.M. Gorbатов» RAS,  
Vidnoye, Moscow region, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Russia

<sup>3</sup>Tecleor LLC, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

## **EFFECT OF PROCESSING THE SURFACE OF FRESH CHAMPIGNONS BY RELATIVISTIC ELECTRONS**

In this work investigations of the inhibition of the culture of *Salmonella spp.* on the surface of champignon mushrooms (treated with relativistic electrons in comparison with the inhibition of culture on the surface of models (model media) also treated with relativistic electrons are carried out. Irradiation was carried out on an UELR-10-15-C-60-1 accelerator with an electron energy of 10 MeV with doses of 0.8 kGy, 1.0 kGy, 2.0 kGy and 3.0 kGy. The irradiated samples were analyzed to determine the residual amount of surviving microflora. Quantitative characteristics of the efficiency of inhibition of *Salmonella spp.* were obtained under influence of various radiation doses.

При облучении чистых культур релятивистскими электронами, наибольшей устойчивостью обладает культура *Salmonella spp.* которая является широко распространенным в природе микроорганизмом, способным на протяжении длительного периода времени сохранять жизнеспособность во внешней среде на растительном сырье. Данная культура является патогенной. Исследования, проведенные ранее, показали эффективность угнетения культуры *Salmonella spp.* на поверхности модельных сред.

Целью исследования является проведение корреляции экспериментальных данных по ингибированию культуры *Salmonella spp.* на поверхности модельных сред и на поверхности шляпок грибов шампиньонов.

Суточную культуру микроорганизмов готовили путем культивирования взвеси *Salmonella spp.* в жидкой питательной среде МПБ (фирма HiMedia) при температуре 37°C (термостат СПУ 1/80) в течение 24 часов. Полученную суспензию с применением стерильного шпателя и серологической пипетки равномерно наносили по поверхность шляпки свежих грибов и подсушивали на воздухе в ламинарном боксе (2 - класс защиты с встроеными и поверенными фильтрами HEPA-14) до полного их высыхания. Полученные зараженные образцы упаковывали в полиэтиленовые контейнеры с последующим облучением релятивистскими электронами. Облучение проводили в компании ООО «Теклеор» на ускорителе УЭЛР-10-15-С-60-1 с энергией электронов 10 МэВ дозами 0,8 кГр, 1,0 кГр, 2,0 кГр и 3 кГр. Контроль за дозой осуществлялся с использованием пленочных дозиметров.

В облученных образцах изучалось остаточное количество микрофлоры на поверхности грибов. Были получены количественные характеристики эффективности ингибирования культуры *Salmonella spp.* под воздействием релятивистских электронов. Для проведения корреляции экспериментальных данных проведены исследования эффективности ингибирования чистой культуры микроорганизмов на поверхности модельных сред.

Полученные экспериментальные данные были статистически обработаны, и выявлена динамика ингибирования культуры *Salmonella spp.* на поверхности модельных сред и на шляпках свежих грибов.

Проведенные исследования показали, что для полного ингибирования начального количества микроорганизмов, равного  $2,0 \times 10^4$  КОЕ/г на поверхности шляпки гриба, - достаточно 1 кГр, в то время как облучение более высокого начального количества микроорганизмов требует более высокой дозы облучения: до 4 кГр. Результат исследования показал, что несмотря на различие изначального количества микроорганизмов на поверхности грибов ( $2,0 \times 10^4$ ) и в модельных средах ( $2,0 \times 10^7$ ), динамика ингибирования микробальной культуры на поверхности шляпок грибов и динамика ингибирования культуры на поверхности модельных сред коррелируют между собой.

## Секция

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Руководитель секций

– Юрков Дмитрий  
Игоревич, к.т.н., зав.  
кафедрой 24

Секретарь секций

– Масленников Сергей  
Павлович, д.т.н.,  
профессор кафедры 24

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9796

E-mail: [SPMaslennikov@mephi.ru](mailto:SPMaslennikov@mephi.ru)

А.Н. АБЛЕЕВ, Е.М. КУДРЯВЦЕВ, А.И. МАКСИМКИН, А.А.  
МОШЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, И.И. РОДЬКО, К.Л. СЕРГЕЕВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕСТОВОГО ОБРАЗЦА ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВИХРЕТОКОВОЙ УСТАНОВКИ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ ОБОЛОЧЕК ОТРАБОТАННЫХ ТВЭЛОВ**

Важным вопросом метрологического обеспечения в области неразрушающего контроля является применение для поверки, калибровки, настройки и контроля работоспособности средств неразрушающего контроля так называемых «тестовых образцов», которые должны быть изготовлены из тех же материалов и по тем же технологиям, что и контролируемое изделие, и содержать дефекты определенных размеров.

A.N. ABLEEV, E.M. KUDRIAVTSEV, A.I. MAKSIMKIN,  
A.A. MOSHEV, V.N. PETROVSKII, I.I. RODKO, K.L. SERGEEV  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia*

## **FABRICATION OF A TEST SAMPLE FOR THE METROLOGICAL SUPPORT OF AN EDDY CURRENT TESTING UNIT FOR TESTING THE DEFECTIVENESS OF SPENT FUEL ELEMENT SHELLS**

An important issue of metrological assurance in the field of non-destructive testing in protective chamber conditions is the use for verification, calibration, adjustment and monitoring of the performance of non-destructive testing means of so-called “test samples”, which must be made of the same materials and using the same technologies as the controlled ones. product, and contain defects of certain sizes.

В рамках стратегической программы исследований ГК «Росатом», осуществляемой Технологической платформой «Замкнутый ядернотопливный цикл с реакторами на быстрых нейтронах» выполняются работы по оснащению защитных камер оригинальным оборудованием, в том числе, вихретоковыми дефектоскопами для первичных послереакторных неразрушающих исследований свойств критически важных материалов реакторов на быстрых нейтронах. Вихретоковый контроль – неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия внешнего

электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем. Вихретоковый контроль проводят в целях выявления поверхностных и подповерхностных дефектов в металлических конструкциях и деталях [1]. Для установки порога чувствительности, калибровки, поверки и расширения возможностей вихретоковых дефектоскопов, эксплуатируемых в защитных камерах, был изготовлен тестовый образец (ТО). При изготовлении ТО была разработана специальная технология нанесения дефектов в оболочках твэлов реакторов на быстрых нейтронах, заключающаяся в обработке импульсным лазерным лучом оболочки твэла, были получены искусственные дефекты различных типов: кольцевые и продольные риски, сквозные отверстия. На рисунке 1 приведён эскиз изготовленного тестового образца.

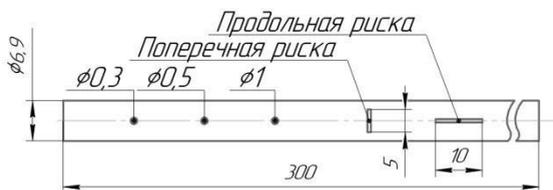


Рис. 1. Эскиз тестового образца

Перед нанесением на заготовку искусственных несплошностей был проведён вихретоковый контроль её поверхности и установлено, что уровень шума, связанный с наличием существующих несплошностей, геометрических и электромагнитных аномалий материала, а также шероховатость заготовки меньше того уровня, который определяется условиями фиксации несплошностей. Расположение искусственных несплошностей на ТО было подобрано таким образом, чтобы на информативные сигналы не влияло наличие соседних несплошностей и краев образца. Идентификационные признаки дефектов (амплитуда, полярность, скорость нарастания отклика и др.), полученные с помощью ТО, в дальнейшем используются для расшифровки вихретоковых диаграмм исследуемых оболочек твэлов. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Соглашение № 14.578.21.0258, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57817X0258.

#### *Список литературы*

[1] Баранов В.М., Карасевич А.М., Сарычев Г.А. Диагностика материалов и конструкций. М.: Высшая школа, 2007. 379 с.

А.В. АРХИПОВ, Е. П. ГЛОТОВ, А.Н. ДАРМАЕВ,  
Д.А. КОМАРОВ, С.П. МОРЕВ, Ю.А. МИРОШНИКОВ  
*АО Научно-производственное предприятие «ТОРИЙ», Москва, Россия*

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕГАРМОНИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ФОКУСИРУЮЩЕГО ПОЛЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В МАГНИТНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ**

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований транспортировки протяженных интенсивных электронных потоков в периодических магнитных полях с несинусоидальным распределением. Найдено легко реализуемое негармоническое распределение с локальными минимумами на полупериоде магнитного поля, обеспечивающее малые пульсации границы интенсивного электронного потока при высоких значениях параметра магнитного поля.

A.V. ARKHIPOV, E. P. GLOTOV, A.N. DARMAEV,  
D.A. KOMAROV, S.P. MOREV, J.A. MIROSHNIKOV  
*Research and Production Enterprise "TORIY", Moscow, Russia*

## **APPLICATION OF NON-SINUSOIDAL MAGNETIC FOCUSING FIELD DISTRIBUTION FOR INTENSE ELECTRON BEAM TRANSPORTATION**

The theoretical and experiments results of intense electron beam transportation in the non-sinusoidal magnetic focusing fields are presented. An easily realizable non-harmonic distribution with local minima in the half-period of the magnetic field is found, providing small pulsations of the intense electron beam at high values of the magnetic field parameter.

Вопросы, связанные с различными аспектами фокусировки протяженных интенсивных электронных потоков магнитными периодическими полями, неоднократно обсуждались в литературе [1-3]. Однако это обсуждение ограничивалось рассмотрением, помимо первой гармоники в распределении осевой компоненты индукции магнитного поля [1], третьей [2] или пятой [3,4] гармониками магнитного поля. Кроме того, зачастую за рамками рассмотрения оказывались вопросы

практической реализации магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) с необходимым набором высших гармонических составляющих (ВГС). При гармоническом распределении магнитного поля [1], транспортировка протяженного электронного потока с малыми амплитудами пульсаций, не нарастающими к выходу ЭОС, достигается при параметре магнитного поля менее 0,4. За счет ввода в распределение осевой компоненты индукции магнитного поля высших гармонических составляющих удается сдвинуть область параметрического резонанса в сторону более высоких значений параметров магнитного поля [2,3].

В настоящей работе представлены результаты исследований транспортировки интенсивных электронных потоков в МПФС, элементы конструкции которых образуют пролетный канал и пространственно совмещены с элементами замедляющей системы, вследствие чего гармонический состав распределения осевой компоненты индукции магнитного поля может существенно отличаться от синусоидального распределения.

Рассматривались совмещенные с ЗС ячейки МПФС, период которых равнялся либо удвоенному, либо учетверенному периоду замедляющей системы. В МПФС, ячейки которой не содержат магнитомягких вставок, реализуется распределение магнитного поля, близкое к синусоидальному. При наличии одной магнитомягкой вставки в распределении магнитного поля содержатся, помимо первой, значимые величины третьей и пятой гармоник магнитного поля. В МПФС с тремя вставками реализуется распределение, содержащее значимые величины первой, третьей, пятой и седьмой гармоник магнитного поля.

Найдено легко реализуемое в совмещенных МПФС распределение магнитного поля, которое существенно смещает положение зоны неустойчивой фокусировки пучка в сторону более высоких значений параметра магнитного поля, и позволяет повысить величину параметра магнитного поля более чем в восемь раз (с 0,3 до 2,88).

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности применения распределений магнитного поля с тремя локальными минимумами на полупериоде МПФС для фокусировки интенсивного электронного потока в мощных ЛБВ.

#### *Список литературы*

- [1] Данович И.А. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1966, Вып. 9, С.20.
- [2] Бахрах Л.Э. и др. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. Вып. 10. С.39.
- [3] Кивокурцев А. Ю. и др. // ЛБВ с МПФС / Пат. N2091898, Россия, N 96108336/07.
- [4] Кобец Е.Н. и др. // Электронная техника. Ферритовая техника, 1971, Вып.3, С.58

Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, М.С. ДМИТРИЕВ, А.П. КЛАЧКОВ, А.В.  
НЕСТЕРОВИЧ, А.Г. ПОНОМАРЕНКО, А.Е. ШИКАНОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ДОБЫЧИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ**

Сообщается о разработке аппаратуры для локального индукционного нагрева насосно-компрессорных или обсадных труб в нефтяных скважинах, а также для генерации ультразвуковых акустических колебаний с целью повышения проницаемости призабойной зоны нефтеносного пласта с высоковязкой нефтью. Аппаратура предполагает питание током с частотой ~20 кГц от преобразователя, располагаемого внутри скважины поблизости от исполнительных устройств.

B.YU. BOGDANOVICH, M.S. DMITRIEV, A.P. KLACHKOV,  
A.V. NESTEROVICH, A.G. PONOMARENKO, A.E. SHIKANOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia*

## **ELECTROPHYSICAL EQUIPMENT FOR EXTRACTION OF HIGH-VISCOSITY OIL**

It is reported on the development of equipment for local induction heating of pumpcompressor or casing pipes in oil wells, as well as for the generation of ultrasonic acoustic vibrations in order to increase the permeability of the bottomhole zone of an oil-bearing formation with high-viscosity oil. The equipment supposes the supply of current with a frequency of ~20 kHz from the DC to AC converter located inside the well in the vicinity of the actuators.

В Российской Федерации до 75% разведанных запасов нефти являются трудноизвлекаемыми. Сюда относятся, в частности, высоковязкие нефти. С 2015г. по настоящее время НИЯУ МИФИ, согласно соглашениям с РНФ №№ 15-19-00151 и 15-19-00151-П, выполняет НИР по тематике

«Разработка новых технологий интенсификации добычи тяжелых нефтей». В этот период предложены новые технические решения, в том числе, подтвержденные патентами РФ [1-4].

Главная проблема, осложняющая добычу высоковязкой нефти с большим содержанием парафина, состоит в образовании асфальтосмолисто-парафиновых отложений (АСПО) внутри насоснокомпрессорных (НКТ) и обсадных труб скважин (ОТС) вследствие неизбежного снижения давления, испытываемого нефтью в

процессе ее добычи. Сказанное приводит к падению дебита скважин вплоть до их полной остановки, несмотря на большой остаток нефти в пласте.

Предлагаемые авторами технологические решения по облегчению добычи высоковязких нефтей направлены на решение следующих задач:

1. Своевременное удаление АСПО изнутри ОТС или НКТ при минимальных затратах труда, материалов и энергии. При этом нежелательны перерывы в добыче нефти или применение токсичных веществ и технологий, ухудшающих экологическую обстановку.

2. Ультразвуковое воздействие на призабойную зону пласта, благодаря которому улучшается его пропускная способность для частиц высоковязкой нефти.

Указанные задачи решаются путем локализованного индукционного нагрева участков ОТС или НКТ и генерации акустической волны электродинамическим излучателем. Оба устройства питаются током с частотой ~20 кГц от преобразователя, размещаемого недалеко от них внутри скважины. Преобразователь получает энергию с поверхности Земли в виде постоянного тока напряжением до 300 В и мощностью до 3 кВт. В рабочем режиме между преобразователем и индуктивно-резистивной нагрузкой обеспечивается реактивный энергообмен с мощностью до 40-50 кВАр.

#### *Список литературы*

- [1] Богданович Б.Ю и др. Формирователь температурного и акустического полей в скважине. Патент РФ №168526 от 7.02.2017.
- [2] Богданович Б.Ю и др. Способ повышения нефтеотдачи пласта с высоковязкой нефтью. Патент РФ № 2631451 от 02.09.2017 г.
- [3] Клачков А.П., Пономаренко А.Г. Полумостовой преобразователь постоянного тока в переменный. Патент РФ № 179238 от 07.05.2018 г.
- [4] Клачков А.П., Пономаренко А.Г., Шиканов А.Е. Способ генерации электрических квазигармонических колебаний в индуктивно-резистивной нагрузке. Патент РФ № 2669382 от 11.10.2018

**А.В. БОЙКО, В.П. КИРЕЕВ, В.Г. КОВАЛЕНКО,  
С.А. КОРНИЕВСКИЙ**

*Акционерное общество «Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «СНИИП»), Москва, Россия.*

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА ОБМЕРА ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДОЗИМЕТРОВ**

Рассмотрены пути совершенствования измерительных и эксплуатационных параметров устройства измерительного термолюминесцентных дозиметров. Исследована возможность применения ФЭУ с микроканальным усилением для регистрации сигналов с детекторов. Рассмотрена возможность использования устройства нагрева детекторов, основанного на явлении нагрева тела токами высокой частоты.

**A.V. BOYKO, V.P. KIREEV, V.G. KOVALENO, S.A.  
KORNIEVSKY**

*Specialized Scientific Research Institute for Instrumentation Engineering (JSC “SNIP”), Moscow, Russia*

## **MODERNIZATION OF THE DEVICE FOR MEASURING THERMOLUMINESCENT DOSIMETERS**

Ways to improve the measuring and operating parameters of the device for measuring thermoluminescent dosimeters are considered. The possibility of using a microchannel amplification PMT for recording signals from detectors has been investigated. The possibility of using a device for heating detectors based on the phenomenon of body heating by high-frequency currents is considered.

Среди дозиметров, предназначенных для обеспечения задач текущего контроля индивидуального облучения работников предприятий ядерного топливного цикла, наиболее широкое распространение получили дозиметры с термолюминесцентными детекторами (ТЛД). К достоинствам дозиметров этого типа относятся: высокая скорость обработки и возможность её автоматизации, низкая стоимость, малые размеры и вес, многократность использования. Непрерывное совершенствование приборов, направленное на улучшение эксплуатационных параметров, является необходимым условием удовлетворения постоянно повышающемуся уровню требований норм радиационной безопасности.

В АО «СНИИП» был разработан и изготавливается комплект индивидуальных дозиметров КИД-11, предназначенный для измерения доз

фотонного и нейтронного излучения, дозы в коже. В работе рассмотрены пути совершенствования измерительных и эксплуатационных характеристик устройства обмера индивидуальных дозиметров.

Было предложено заменить традиционный ФЭУ на ФЭУ с микроканальным усилением УФК-4Г-2 (далее ФМУ). ФМУ обладает существенно меньшими (более чем в 2 раза) габаритами, имеет встроенный источник высоковольтного питания, нечувствителен к магнитному полю, обладает малым темновым током.

ФМУ был установлен в устройство обмера индивидуальных дозиметров вместо традиционного ФЭУ с диодной системой усиления и исследован. На основе исследований можно сделать вывод, что установка ФМУ в устройство обмера термомлюминесцентных дозиметров даёт возможность увеличить динамический диапазон измерения дозы за счет уменьшения нижнего предела при сохранении верхнего предела указанного диапазона. Однако из-за ограниченного динамического диапазона частот ФМУ необходимо усложнить алгоритм отжига детекторов дозиметров. Кроме того, использование ФМУ позволяет уменьшить габаритные размеры измерительного устройства благодаря замене ФЭУ-148-2 и платы его высоковольтного питания на малогабаритный ФМУ.

Другим направлением проделанной работы было совершенствование нагревателя детекторов. На данный момент в измерительном устройстве нагревающим элементом является галогенная лампа с инфракрасным фильтром мощностью 60 Вт. Недостатком такого типа нагревателя является его сложная конструкция, обусловленная гарантированно высокой избирательностью по длине волн излучения. Альтернативой бесконтактного нагревателя является индукционный нагреватель, не создающий излучения в видимом диапазоне длин волн. Был создан и испытан макет установки индукционного нагрева.

В качестве испытаний установки индукционного нагрева был произведён нагрев детектора до температур 320°C и 250°C. Скорость нагрева оказалось примерно равной скорости нагрева инфракрасным нагревателем. После нагрева всех детекторов одного дозиметра необходима пауза в 150 секунд для охлаждения элементов нагревателя.

Поэтому, чтобы избавиться от потерь времени и повысить точность измерений, необходимо создание системы охлаждения, обеспечивающей непрерывную работу индукционного нагревателя.

П.Г. ВАСИЛЬЕВА<sup>1</sup>, Н.Г. ИГНАТЬЕВ<sup>2</sup>, И.Е. ОРЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕГМЕНТИРОВАННОСТИ СЦИНТИЛЛЯТОРА БОЛЬШОГО ОБЪЕМА НА ВРЕМЯ СВЕТОСБОРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИХ WLS-СВЕТОВОДОВ**

В работе представлены результаты численных исследований влияния сегментированности сцинтиллятора большого объема на временное разрешение детектора при светосборе зелеными WLS-световодами.

P.G. VASILUEVA<sup>1</sup>, N.G. IGNATIEV<sup>2</sup>, I.E. ORLOV<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia

<sup>2</sup>All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia

## **INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF A LARGE VOLUME SEGMENTED SCINTILLATOR ON THE LIGHT COLLECTION TIME WITH USING WAVE LENGTH SHIFTER FIBERS**

The paper presents the results of a numerical study of the effect of high-volume segmented scintillator on the temporal resolution of a detector with using green WLS fibers.

Сцинтилляционные детекторы широко применяются при проведении измерений в различных областях экспериментальной физики [1,2]. Объем сцинтиллятора классических детекторов типа ССДИ8 составляет ~0.2 л. Для повышения точности и информативности измерений параметров потоков гамма-нейтронного излучения применяют детекторы с объемом сцинтиллятора до нескольких литров. Обычно при таком объеме сцинтиллятора площадь его светособирающей поверхности значительно превышает площадь фотокатода высокоточного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), что приводит к уменьшению равномерности и эффективности светосбора и увеличению временного разрешения детектора за счет возрастания времени светосбора в сцинтилляторе.

Для увеличения эффективности светосбора и уменьшения временного разрешения большеобъемных детекторов применяют сцинтилляторы в форме усеченного конуса, различные фоконны, волоконные жгуты и др. На практике наиболее эффективным решением является использование спектросмещающих (WLS) световодов, которые способны поглощать излучение сцинтиллятора своей боковой поверхностью. Применение WLS-световодов позволяет эффективно проводить сбор излучения сцинтиллятора с площадью рабочей поверхности на порядок большей площади фотокатода ФЭУ.

При расчетах использовались зеленые WLS-световоды, спектр поглощения которых хорошо согласуется со спектром свечения полистирольных сцинтилляторов, а спектр излучения – со спектральной чувствительностью ФЭУ типа СНФТ.

Расчеты проведены как для цельного сцинтиллятора с габаритами 15х30х50 см, так и для сцинтиллятора, разделенного на две, три и четыре равные светоизолирующие друг от друга части. В обоих случаях WLS-световоды полностью покрывали одну из больших поверхностей сцинтиллятора, как показано на рисунке 1.

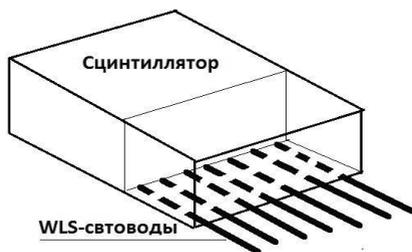


Рис. 1. Схема размещения WLS-световодов на сцинтилляторе

Остальные поверхности имели коэффициент отражения 0,95. Методом Монте-Карло моделировались траектории движения каждого фотона сцинтилляции до момента его поглощения в веществе сцинтиллятора и WLS-световодах.

Расчеты показали, что сегментированность сцинтиллятора приводит к увеличению суммарного времени светосбора. Наиболее оптимальной конструкцией является цельный сцинтиллятор с полным заполнением рабочей поверхности WLS-световодами.

*Список литературы*

- [1] A. Articov. // Nucl. Instr. Meth. . 2005. V. 555. P. 125-131.
- [2] S.V. Metnichuk // Funct. Materials. 2004. V. II. No4.

А.М. ВОЛКОВА<sup>1</sup>, П.И. КОНОВАЛОВ<sup>1</sup>, А.С. ШЛЫГИН<sup>1</sup>,  
А.Ю. СОКОЛОВ<sup>1</sup>, И.Г. ПРЯНИШНИКОВ<sup>1</sup>, А.В. РЫЖКОВ<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.  
Духова (ФГУП ВНИИА), Москва, Россия*  
<sup>2</sup> *ИФВ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, Россия*

## **МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ ДЛЯ ПЛАНАРНЫХ ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Представлен метод измерения спектрального отношения сигнал-шум для планарных электронно-оптических преобразователей. Представлены результаты измерений отношения сигнал-шум макетов электронно-оптических преобразователей с различным материалом фотокатода в полихроматическом свете с цветовой температурой 2850 К и в монохроматическом излучении с различными длинами волн. Имеется зависимость величины спектрального отношения сигналшум для различных длин волн от спектральной чувствительности фотокатода.

A.M. VOLKOVA<sup>1</sup>, P.I. KONOVALOV<sup>1</sup>, A.S. SHLYGIN<sup>1</sup>,  
A.Y. SOKOLOV<sup>1</sup>, I.G. PRYANISHNIKOV<sup>1</sup>, A.V. RYZHKOV<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> *All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*  
<sup>2</sup> *The Russian Federal Nuclear Center «All-Russian Scientific Research Institute Of  
experimental Physics» (RFNC-VNIIEF), Sarov, Russia*

## **METHOD OF MEASUREMENT THE SPECTRAL SIGNAL TO NOISE RATIO FOR PLANAR IMAGE INTENSIFIER TUBE**

A method for measuring the spectral signal to noise ratio for planar image intensifier tube is presented. The results of measurements of the signal to noise ratio of models image intensifier tube with various photocathode materials for polychromatic light 2850 K color temperature and monochromatic light with different wavelengths are presented. There is a dependence of the spectral signal to noise ratio on spectral sensitivity photocathode of planar image intensifier tube.

В соответствии с ГОСТ 21815.19-90 измерение отношения сигнал-шум (англ. Signal-to-Noise Ratio, далее – SNR) должно осуществляться с использованием полихроматического источника света с цветовой температурой 2850 К при освещенности 100 мклк. Выбор таких условий измерения целесообразен для тестирования электронно-оптических

преобразователей (далее – ЭОП), применяемых в составе приборов ночного видения. На сегодняшний день множество ЭОП разрабатывается для задач регистрации монохроматического излучения. В этом случае результаты измерения параметров в полихроматическом свете могут быть использованы для количественного сравнения однотипных ЭОП, но не в полной мере отражают качество этих ЭОП. Целесообразно осуществлять измерения параметров таких ЭОП в монохроматическом излучении, подобрав длину волны и уровень облученности в соответствии с условиями их дальнейшей эксплуатации.

Для ЭОП, выпускаемых ФГУП «ВНИИА», предложен следующий метод измерения спектрального SNR. Монохроматическое излучение заданной мощности и длины волны попадает на анализирующую диафрагму диаметром 0,2 мм, проецирующая система переносит изображение на фотокатод ЭОП, изображение экрана ЭОП при помощи видео микроскопа передается на персональный компьютер, затем программное обеспечение вычисляет SNR для полосы частот 10 Гц.

В соответствии с предложенным методом были проведены измерения SNR макетов ЭОП с различным материалом фотокатода в полихроматическом свете с цветовой температурой 2850К и в монохроматическом излучении с длинами волн  $(410\pm 15)$  нм,  $(530\pm 15)$  нм. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- 1 Величина спектрального SNR для различных длин волн зависит от спектральной чувствительности фотокатода ЭОП.
- 2 Для ЭОП, предназначенных к эксплуатации в условиях излучения с длиной волны  $(410\pm 15)$  нм, результаты измерений SNR с использованием полихроматического источника света с цветовой температурой 2850 К не отражают качество данных ЭОП.

Разработанный метод измерения спектрального SNR ЭОП успешно апробирован на планарных ЭОП производства ФГУП «ВНИИА». Ведется подготовка измерительного стенда к аттестации.

#### *Список литературы*

- [1] ГОСТ 19803-86. Преобразователи электронно-оптические. Термины, определения и буквенные обозначения – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 19 с.
- [2] Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. – М.: Наука, 1978. – 432 с.
- [3] ГОСТ 21815.19-90. Преобразователи электронно-оптические. Методы измерения отношения сигнал-шум. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 17 с.

С.В. ГАВРИШ, В.В. ЛОГИНОВ, С.В. ПУЧНИНА  
*Филиал АО «Стелла – К», Зеленоград, Россия*

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СПАЕВ САПФИРА С МЕТАЛЛАМИ В ИЗДЕЛИЯХ ПЛАЗМЕННОЙ И КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Рассмотрены вопросы получения спаев сапфира с ниобием, функционирующего при высокотемпературном химическом воздействии плазмы щелочных металлов, и со сплавом на основе железа, кобальта и никеля, эксплуатируемого в экстремальных климатических условиях. Выявлены основные механизмы взаимодействия материалов в процессе пайки, описаны особенности технологии и даны рекомендации по использованию в изделиях плазменной и квантовой электроники.

S.V. GAVRISH, V.V. LOGINOV, S.V. PUCHNINA.  
*JSC "STELLA-K", Moscow, Zelenograd, Russian Federation Branch*

## **TECHNOLOGY OBTAINING SAPPHIRE WITH METAL JUNCTURE IN PLASMA AND QUANTUM ELECTRONICS**

It is considered problems obtaining sapphire with niobium juncture that operates at high temperature chemical interaction with alkali metal plasma and juncture of sapphire with cobalt, iron and nickel alloy that operates in extremal climatic conditions. The main mechanisms of materials interactions during sealing and particular properties of technology are detected. It is given recommendations on using the juncture in plasma and quantum electronics.

Интенсивное развитие плазменной и квантовой электроники ставит задачу поиска новых материалов с уникальными характеристиками. Синтетический сапфир (корунд) обладает целым рядом неповторимых свойств (оптическая прозрачность в диапазоне от 0,2 до 6,0 мкм, механическая прочность, химическая стойкость к агрессивным средам и т.д.), которые могут быть с успехом применены в разработках новых приборов. С другой стороны, химическая инертность, анизотропия температурного коэффициента расширения, наличие блочной структуры в монокристаллах корунда сдерживали развитие этих отраслей, так как получить герметичное и технологичное соединение сапфира с металлами до недавнего времени практически не удалось.

В результате исследований выявлено, что наличие блочной структуры приводит к снижению прочности сапфира от 800 МПа до 100 МПа при его

нагреве от комнатной температуры до 800°C. Данный результат позволил по методике Ляме [1] определить расчетным путем минимум термоупругих напряжений в элементах конструкции и получить согласованные цилиндрические спаи сапфира с ниобием и сплавом на основе железа, кобальта и никеля (29 НК, ковар).

Спай сапфир – ниобий. По результатам термодинамического анализа в качестве основного металла использован ниобий с присадкой циркония (до 1,2 вес.%), а для герметизирующего припоя выбрана система на основе  $Al_2O_3$  - CaO с добавлением окислов MgO, BaO. Показано, что введение в состав сплава примеси циркония, снижает миграцию зерен, что при нагреве до 1800°C позволяет сохранить герметичность образца. В стеклокерамическом припое при нагреве до 1380°C наблюдается гомогенизация состава, у которого при 1480°C начинается формирование кристаллических зон, что повышает напряжение в спае. В итоге исследований выбран состав стеклоцемента в следующих весовых соотношениях MgO:  $Al_2O_3$ : CaO=6:49:45 с температурой пайки 1440°C.

Спай сапфир – ковар. Суть разработанной технологии заключается в нанесении магнетронным напылением на поверхность сапфира последовательно активного металла (титана) от одного магнетрона с последующим напылением смеси меди с титаном при работе двух магнетронов. Дальнейшая пайка с коваром производится по нанесенной металлизации расплавлением припоя в виде медной фольги. Надежность предложенного способа обусловлена следующими процессами, происходящими в спае:

- при температуре 1000°C происходит взаимодействие слоя титана с сапфиром и расплавление смеси медь-титан, которая активизирует реакции взаимодействия титана с сапфиром и обеспечивает надежное смачивание основного медного припоя;
- при температуре 1125°C происходит расплавление основного припоя и взаимодействие с коваром и расплавом металлизации.

Микрорентгеновский анализ распределения интенсивности  $K_\alpha$  линий титана и меди позволил выявить наличие в спае интерметаллидов, образующихся при температурах выше 1200°C, что в итоге явилось температурным ограничением разработанной технологии.

В заключении необходимо отметить, что разработанные технологии были успешно опробованы для спаев перечисленных металлов.

#### *Список литературы*

[1] Любимов М.Л. Спаи металла со стеклом. М.: Энергия, 1968. 256 с.

М.Е. ДВОРНИЧЕНКО, В.Г. КАМЕНЕВ, В.Н. ТУРКИН,  
Д.Э. ЭРГАШЕВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.  
Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **ПОКАДРОВАЯ РЕГИСТРАЦИЯ НА ЦИФРОВОЙ ФОТОХРОНОГРАФ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССАХ**

В докладе описывается техника регистрации быстропротекающих процессов, в которой для зондирования исследуемого объекта применяется лазерное излучение, а регистрация осуществляется на цифровой фотохронограф с зеркальной развёрткой. Данная техника позволяет получать серию кадров, разделённых во времени на заданный интервал, и содержащих фраунгоферовские голограммы исследуемого процесса. Важным преимуществом данной системы является возможность получения значительного числа кадров (до нескольких десятков). Использование фраунгоферовской голографии позволяет из каждого кадра восстановить объёмную картину исследуемого процесса.

M.E.DVORNICHENKO, V.G.KAMENEV, V.N.TURKIN,  
D.E.ERGASHEV

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **MULTI-FRAME REGISTRATION ON DIGITAL PHOTOCHRONOGRAPH OF LASER OPTICAL SIGNALS IN FAST PROCESSES**

The report deals with registration technique of high-speed processes, in which laser radiation is used to probe an object under investigation, and the registration is carried out on a digital photochrograph with a mirror scan. This technique allows you to receive a series of frames, separated in time by a given interval, and containing Fraunhofer holograms of the process under study. An important advantage of this system is the possibility of obtaining a significant number of frames (up to several dozen). The use of Fraunhofer holography makes it possible to reconstruct a three-dimensional picture of the process under investigation from each frame.

Одной из актуальных задач при исследовании быстропротекающих газодинамических процессов является регистрация параметров дисперсной фазы при нагружении поверхности ударной волной. При этом возникает движущееся облако частиц и одним из интересующих

параметров является определение размера данных частиц. При этом регистрация частиц осуществляется методом высокоскоростной голографии. Традиционно изображения получают методом Габоровской голографии [1]. Актуальной задачей является развитие цифровой голографии [2,3], требуется развитие методик для повышения качества получаемых изображений, расширения арсенала имеющихся средств, а также развитие методов обработки и восстановления голограмм.

В докладе исследуется метод получения серии голографических интерферограмм в реальном времени. В качестве объекта использовалась проволочка, подрываемая импульсом тока, а в качестве регистратора использовалась высокоскоростная камера с зеркальной разверткой, позволяющая получать необходимое число кадров с частотой съемки между кадрами 1 мкс. В данном устройстве с помощью телеобъектива формируется промежуточное изображение исследуемого процесса, которое затем проецируется на цифровые матрицы с помощью короткофокусного объектива через вращающееся зеркало и линзовую вставку. Зеркало обеспечивает поворот оптической оси и её совмещение в определённые моменты времени с оптическими осями элементов линзовой вставки. Каждый элемент линзовой вставки формирует на матрице отдельный кадр регистрируемого процесса.

Для подсветки объекта использовался лазер с длиной волны 532 нм. Объект устанавливается в коллимированный пучок излучения. При этом часть света рассеивается на объекте и формирует сигнальную волну. Другая часть не взаимодействует с объектом и формирует опорную волну. Интерференция сигнальных и опорных волн содержит информацию об объёмном распределении рассеивателей в исследуемом объекте.

В экспериментах регистрировалась динамика разрушения проволочки, на которую подавался мощный импульс тока, приводящий к её быстрому разогреву и разлёту вещества в окружающее пространство. На примере данного объекта показана возможность использования покадровой регистрации на цифровой фотохронограф для регистрации голограмм.

#### *Список литературы*

- [1] D. S. Sorenson et al. Ejecta Particle-Size Measurements in Vacuum and Helium Gas using Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography, Los Alamos National Laboratory.
- [2] Schnars P. et.al. Digital holography, 2005.
- [3] Kim M. Digital holography microscopy: principles, techniques, and applications.

**М.Е. ДВОРНИЧЕНКО, В.Г. КАМЕНЕВ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **МНОГОКАНАЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

В докладе описывается метод регистрации и восстановления цифровых голограмм, основанный на регистрации нескольких голограмм одного и того же объекта, с последующим восстановлением и усреднением изображений. Для одновременной регистрации нескольких различных голограмм одного и того же объекта используется многоканальная оптическая система. Последующее усреднение изображений объекта, восстанавливаемых из данных голограмм, позволяет повысить отношение сигнал/шум в 3-4 раза. Сравниваются три различных метода восстановления, и анализируется их влияние на последующее усреднение полученных изображений.

**M.E. DVORNICHENKO, V.G. KAMENEV**

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **MULTICHANNEL REGISTRATION AND RESTORATION OF DIGITAL HOLOGRAMS OF MICROSCOPIC OBJECTS**

The report describes the method of registration and restoration of digital holograms, based on the registration of several holograms of the same object, with subsequent restoration and averaging of images. For simultaneous registration of several different holograms of the same object, a multichannel optical system is used. Subsequent averaging of the images of the object reconstructed from the hologram data makes it possible to increase the signal-to-noise ratio by a factor of 3–4. Three different restoration methods are compared and their effect on the subsequent averaging of the images obtained is analyzed

Одним из методов, позволяющих с высокой точностью регистрировать динамику частиц дисперсной фазы в быстропротекающих процессах является цифровая фраунгоферовская голография. В данном методе рассеяние света на частицах формирует сигнальную волну, а нерассеянная часть, распространяющаяся по тому же пути – опорную волну. Регистрация интерференционной картины на цифровую матрицу и последующая математическая обработка позволяет восстановить распределение частиц в пространстве.

При использовании фраунгоферовской голографии [1], микроструктура голограммы состоит из систем концентрических колец, которые формируются каждой частицей отдельно. При восстановлении изображения частицы, помимо искомого действительного изображения, восстанавливается также расфокусированное изображение-двойник и нулевой порядок дифракции, имеющий вид неоднородного фона. Кроме того, при высокой плотности частиц может возникать интерференция сигнальных волн от разных частиц, порождающая дополнительные шумы. Все эти факторы негативно влияют на качество восстановленного изображения.

Получение нескольких голограмм при различном пространственном положении регистрирующих устройств позволяет усреднить регистрируемые изображения, в которых полезный сигнал будет одинаковым, а паразитные сигналы будут различаться. Усреднение сигнала с 4-х каналов позволяет понизить уровень шумов в 3-4 раза.

На эффективность подавления шумов при усреднении в значительной мере влияет степень идентичности полезных сигналов, восстанавливаемых из различных голограмм. Идентичность полезных сигналов зависит в свою очередь от используемых методов восстановления.

Широко используются три основных метода восстановления изображений – преобразование Френеля, свёртка с корреляционными шаблонами и анализ углового распределения. В первом методе восстановление осуществляется с помощью расчёта интеграла Френеля с использованием быстрого преобразования Фурье. Во втором случае используется набор шаблонов функции рассеяния точки для различных расстояний. В третьем – анализируются особенности распределения рассеянного излучения по углам. Экспериментально показано, что наилучшие результаты достигаются при использовании метода корреляционных шаблонов, при котором восстановленные полезные сигналы не подвергаются масштабированию и идентичны по размерам.

#### *Список литературы*

[1] Sorenson D.S. et al. Ejecta Particle-Size Measurements in Vacuum and Helium Gas using Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography // LA-UR-14-24722 2014-06-2.

М.С. ДМИТРИЕВ, А.Д. КОЛЯСКИН, В.Л. ШАТОХИН,  
Р.А. КРАСНОКУТСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ОБЕЗВОЖИВАНИЕ СОЛЕВЫХ ПЛАВОВ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА И ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ**

Сообщается о разработке опытной установки по обезвоживанию РАО. В установке применяется индукционный метод нагрева рабочей камеры на частоте 22 кГц. Описаны эксперименты по обезвоживанию имитаторов радиоактивных отходов.

M.S. DMITRIEV, A.D. KOLYASKIN, V.L. SHATOKHIN,  
R.A. KRASNOKUTSKIY

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

## **DEWATERING OF SALT MELTS OF RADIOACTIVE WASTES FROM NPP BY INDUCTION HEATING AND VACUUM PUMPING OF THE WORKING CHAMBER**

It is reported on the development of a pilot installation for radioactive waste dewatering. The installation uses the induction method of heating the working chamber at a frequency of 22 kHz. Experiments on dewatering of radioactive waste simulators are described.

Обычно радиоактивные отходы (РАО), представляющие собой влагосодержащие солевые плавы или кубовые остатки, хранятся в металлической таре. Такие растворы являются химически агрессивными средами, что создает угрозу разрушения тары и попадания отходов в окружающую среду. При подготовке к длительному хранению или захоронению РАО их необходимо обезвоживать вплоть до удаления основной массы связанной воды. В МИФИ создана опытная установка по обезвоживанию РАО [1, 2]. Главным элементом установки являются рабочая камера цилиндрической формы объемом 216,5 л, диаметром 600 мм из стали Ст. 3 с обрабатываемым материалом. В установке применяется индукционный метод нагрева рабочей камеры с помощью двух транзисторных генераторов типа ВГТ7 с мощностями 15 кВт и 10

кВт на частоте 22 кГц. Для ускорения обезвоживания применяется вакуумная откачка водяных паров насосом марки GMVP-200/65.

Проведены эксперименты по обезвоживанию имитатора радиоактивных отходов, близких по своему составу к отходам одной из действующих АЭС. Рабочую камеру частично заполняли аналогом жидких отходов. Расход реактивов на один эксперимент составил, кг:  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 12,59;  $\text{NaCl}$  – 0,3;  $\text{NaNO}_3$  – 13,8;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 0,56;  $\text{NaOH}$  – 9,34;  $\text{KOH}$  – 1,9;  $\text{FeO}$  – 0,0013;  $\text{H}_2\text{O}$  – 10. Общая масса компонентов для одного эксперимента составляла 48,5 кг, массовая доля влаги 20,5 %.

Содержание влаги в подготовленном образце составило 31,9 % по массе, что включает в себя как воду, использованную для приготовления имитатора, так и влагу, содержащуюся в исходных реактивах. В экспериментах влажность и остаточное содержание связанной воды в плаве определялись с помощью измерителя влажности ЭЛВИЗ 2С.

Проведены эксперименты по обезвоживанию имитатора солевого плава. Длительность обезвоживания составляла 60 мин, максимальная производительность 11,5 л/ч при мощности индукционного нагрева 15,1 кВт. Конечный продукт имел порошкообразное состояние. Обезвоживание протекало при температуре обрабатываемых образцов в диапазоне 150 – 200 °С.

Содержание связанной воды в конечном продукте составило 5 % по массе. Свободной воды в конечном продукте нет. Производительность по выпариванию свободной воды не менее 10 л/ч, рабочая температура процесса не превышает 250 °С, способ обезвоживания плавов исключает физический контакт между рабочими частями установки и рабочей средой. Установку, можно использовать для переработки жидких отходов в виде плавов и кубовых остатков.

Обезвоженные плавы хранились 6 лет в рабочей камере при нормальных условиях и не вызывали коррозии ее стенок. Выполненные в январе 2019 года измерения показали, что в имитаторе произошло некоторое накопление атмосферной влаги. Содержание влаги в образцах составило (6 – 14) % по массе. Состояние имитатора и стенок камеры позволяют надеяться на увеличение длительности хранения РАО в обезвоженном состоянии.

#### *Список литературы*

- [1] Дмитриев М.С. и др. // Ядерная физика и инжиниринг, 2013. Т. 4. № 4, с. 308-312..  
[1] Дмитриев М.С. и др. // Атомная энергия. 2014. Т. 117. Вып. 1. С. 33-36.

М.С. ДМИТРИЕВ, А.П. КЛАЧКОВ, А.Г. ПОНОМАРЕНКО  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ТЕХНОЛОГИИ НЕФТЕДОБЫЧИ**

Сообщается об оценке теплофизической эффективности метода добычи высоковязкой нефти, основанного на индукционном нагреве участка насоснокомпрессорной или обсадной трубы добывающей скважины. Благодаря высокому электродинамическому к.п.д. предлагаемой аппаратуры и локализации зоны нагрева требуемая мощность питания на порядок ниже, чем при традиционных тепловых методах удаления отложений парафина, снижающих дебит скважин.

M.S. DMITRIEV, A.P. KLACHKOV, A.G. PONOMARENKO  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia*

## **THERMOPHYSICAL FOUNDATIONS OF EQUIPMENT FOR LOCAL INDUCTION HEATING IN OIL PRODUCTION TECHNOLOGY**

The evaluation of the thermophysical efficiency of the method of high-viscosity oil extraction, based on induction heating of a section of a pumping or casing production well, is reported. Due to the high electrodynamic efficiency of the proposed equipment and localization of the heating zone, the required power of the supply is an order of magnitude lower than with the traditional thermal methods of removing wax deposits, which reduce well production.

В Российской Федерации до 75% разведанных запасов нефти являются трудноизвлекаемыми. Основной причиной этого является самопроизвольное падение дебита скважин, обусловленное выпадением асфальто-смолисто-парафиновых отложений (АСПО) внутри насоснокомпрессорных (НКТ) и обсадных труб скважин (ОТС) с высоковязкой нефтью [1]. В период с 2015 г. НИЯУ МИФИ, согласно соглашению РНФ № 15-19-00151, выполняет НИР по тематике «Разработка новых технологий интенсификации добычи тяжелых нефтей», в ходе которой были выработаны некоторые новые технические решения [2,3]. Одно из них основывается на использовании индукционного соленоидального нагревателя, который перемещается внутри или снаружи обрабатываемой трубы соосно с нею. В окрестности обмотки

индуктора при ее питании переменным током с частотой  $\Pi 10^4$  Гц возбуждается магнитное поле, которое индуцирует в скин-слое ближайшей стенки трубы вихревой ток встречного направления. Последний вызывает разогрев трубы на участке, длина которого близка к осевому размеру обмотки. Питание индуктора производится от преобразователя постоянного тока в переменный, который располагается поблизости от него внутри скважины и содержит, помимо элементов силовой электроники, конденсаторную батарею [2]. С обмоткой индуктора батарея образует высокочастотную колебательную систему с мощностью реактивного энергообмена до 40-50 кВАр при мощности тепловыделения  $\Pi 3$  кВт.

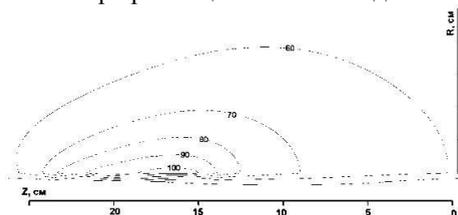


Рис. 1. Изотермы 60-100°C в момент  $t = 204$  с: в нефтеносном пласте ( $R > 9$  см); внутри стенки ОТС ( $8 \text{ см} < R < 9$  см); в слое АСПО ( $7,5 \text{ см} < R < 8$  см). Индуктор длиной 10 см движется вдоль оси  $Z$  со скоростью 5 см/мин.

На рис. 1 показаны результаты расчета программой ANSYS теплофизической обстановки в окрестности индуктора, движущегося внутри стальной ОТС в направлении возрастания координаты  $Z$ . Пространство теплофизического моделирования – цилиндр  $H = 400$  мм,  $R = 210$  мм. Диапазон температур плавления АСПО от 60°C до 70°C, удельная теплота плавления  $\Pi = 150$  кДж/кг. Мощность нагрева 3 кВт, что на порядок ниже мощностей, используемых при традиционных методах [1]. Из рис. 1 следует, что частицы АСПО, расположенные на внутренней поверхности трубы ( $R = 8$  см), пребывают в жидком состоянии всех фракций на участке трубы длиной около 15 см в течение 3 минут. Этого достаточно для того, чтобы нерасплавленные части АСПО были взломаны и удалены вместе с потоком добываемой нефти.

#### Список литературы

- [1] Булатов А.И., Кусов Г.В., Савенок О.В.. Асфальто-смоло-парафиновые отложения и гидратообразования: Предупреждение и удаление. Краснодар: Изд. Дом – Юг, 2011 г.
- [2] Клачков А.П., Пономаренко А.Г. Полумостовой преобразователь постоянного тока в переменный. Патент РФ № 179238 от 07.05.2018 г.
- [3] Богданович Б.Ю. и др. Способ повышения нефтеотдачи пласта с высоковязкой нефтью. Патент РФ № 2631451 от 22.09.2017.

Ш.М. ИСМАИЛОВ<sup>1,2</sup>, В.Г. КАМЕНЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **РЕГИСТРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ЦИФРОВОЙ ФОТОХРОНОГРАФ С ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЁРТКОЙ**

В данной работе описывается техника регистрации быстропротекающих процессов, в которой для зондирования исследуемого объекта применяется лазерное излучение, а регистрация осуществляется на цифровой фотохронограф с зеркальной развёрткой. Регистрируется угловое распределение излучения, рассеянного по направлению строго назад, и содержащего интерференционный пик когерентного обратного рассеяния. С помощью щелевой диафрагмы, располагаемой в Фурье-плоскости оптической системы, из углового распределения вырезается узкая полоса, которая проецируется на регистраторы через вращающееся зеркало фотохронографа. При этом регистрируется непрерывное изменение во времени для углового профиля обратно рассеянного излучения.

SH.M. ISMAILOV<sup>1,2</sup>, V.G. KAMENEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **REGISTRATION OF COHERENT BACKSCATTERING ON A DIGITAL PHOTOCHRONOGRAPH WITH A MIRROR SCANNING**

This paper describes the technique of registering high-speed processes in which laser radiation is used to probe an object under investigation, and the registration is carried out on a digital photochronograph with a mirror scan. The angular distribution of the radiation scattered in the strictly backward direction and containing the interference peak of coherent backscattering is recorded. Using a slit diaphragm located in the Fourier plane of the optical system, a narrow band is cut out from the angular distribution, which is projected onto the recorders through the rotating mirror of the digital photochronograph. This records a continuous change in time for the angular profile of the backscattered radiation.

Явление когерентного обратного рассеяния света состоит в резком возрастании интенсивности света, рассеянного случайно-неоднородной средой, в малом телесном угле (порядка отношения длины волны к длине свободного пробега фотона) в направлении, противоположном направлению падения света [1]. Результаты измерений профиля когерентного обратного рассеяния от пылевого облака позволяют оценить транспортную длину пробега фотонов в среде и характерных размеров неоднородностей среды [2].

В большинстве схем регистрации когерентного обратного рассеяния в фокальной плоскости располагается кадровое регистрирующее устройство, записывающее двумерный массив распределения интенсивности. Далее производится аксиальное усреднение данного массива относительно максимума и построение усреднённого профиля.

При этом кадры регистрируются с заданной экспозицией и межкадровым интервалом, которыми определяется разрешение по времени. Недостатком данной схемы является дискретность регистрации углового профиля. При использовании фотохронографа с зеркальной развёрткой достигается непрерывная регистрация профиля когерентного обратного рассеяния. Для выделения профиля из двумерного распределения интенсивности в Фурьеплоскости оптической системы устанавливается щелевая диафрагма. На рисунке 1 показано результаты регистрации КОР от взвеси корунда в эпоксидной смоле, зарегистрированные с помощью данного метода.

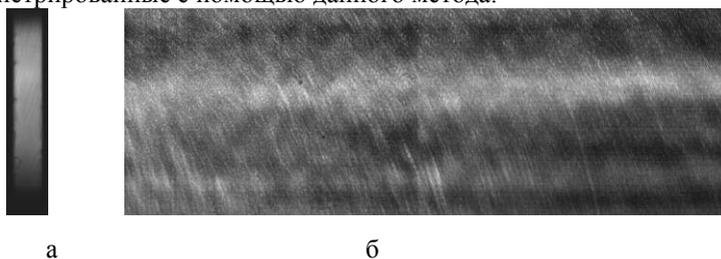


Рис. 1. Развёртка профиля КОР, зарегистрированная на цифровой фотохронограф.

Таким образом, продемонстрирована возможность реализации непрерывной регистрации КОР с помощью зеркального фотохронографа.

*Список литературы*

- [1] Corey R. et al. // Am. J. Phys. 63 (6), June 1995.
- [2] Кузьмин В.Л., Романов В.П. // УФН т.166 (№3), Март 1996 г.

**В.Г. КАМЕНЕВ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССАХ**

В докладе описывается серия экспериментальных исследований, направленных на повышение эффективности лазерно-оптических методов регистрации параметров дисперсной фазы. Используются методы кадровой регистрации изображений частиц, когерентного обратного рассеяния, а также лазерногетеродинный метод. Для повышения эффективности кадровой регистрации частиц предложен метод повышения разрешения за счёт формирования мнимого увеличенного изображения. Метод когерентного обратного рассеяния адаптирован к условиям газодинамических опытов благодаря использованию электроннооптического преобразователя в фокальной плоскости оптической системы. В лазерно-гетеродинном методе исследованы факторы, влияющие на отношение сигнал/шум.

**V.G. KAMENEV**

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA), Moscow, Russia*

## **EFFICIENCY IMPROVEMENT OF LASER-OPTICAL METHODS OF DISPERSE PHASE REGISTRATION IN FAST PROCESSES**

The report describes a series of experimental studies aimed at improving the efficiency of laser-optical methods for recording parameters of the dispersed phase. Methods of personnel registration of images of particles, coherent backscattering, and also laserheterodyne method are used. To improve the efficiency of personnel registration of particles, a method is proposed for increasing the resolution by forming an imaginary enlarged image. The method of coherent backscattering is adapted to the conditions of gas-dynamic experiments through the use of an electron-optical converter in the focal plane of the optical system. In the laser-heterodyne method, factors affecting the signal-to-noise ratio are investigated.

Разработка методов регистрации структуры и динамики конструкционных материалов в при ударно-волновом нагружении является актуальной научной задачей. При этом процессы откола, микрокумуляции, диспергирования вещества - т.н. пыление - остаются в

недостаточной мере изученными. Для получения информации о размерах и скоростях частиц в процессах пыления лазерно-оптические методы являются одними из наиболее информативных.

При непосредственной регистрации изображений частиц наличие значительного числа компонентов в оптическом тракте приводит к потере качества изображения вследствие ухудшения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ). Оптимизация ЧКХ является актуальной задачей при оптимизации и модернизации данной группы методов [1,2]. При использовании дополнительного объектива и формировании с помощью него мнимого изображения исследуемого объекта с увеличением в 3 раза происходил резкий скачок разрешающей способности, позволяющий регистрировать объекты с разрешением до 200 п.л./мм.

Для регистрации параметров частиц пыли также может быть использован метод когерентного обратного рассеяния (КОР). Данный метод заключается в регистрации распределения по углам рассеянного назад излучения, в котором содержится резкий интерференционный пик в направлении строго назад. Анализ формы данного пика позволяет определить транспортную длину пробега фотонов в дисперсной фазе, связанную с плотностью пыли. Применение в схеме регистрации КОР узла, состоящего из электронно-оптического преобразователя и цифровой камеры, позволило адаптировать данный метод к условиям газодинамических экспериментов и зарегистрировать сигнал КОР в быстротекающих процессах.

Характерная особенность лазерно-гетеродинного метода PDV – высокие потери излучения на объекте, приводящие к падению принимаемого сигнала на 5-6 порядков по отношению к зондирующему сигналу. При этом часто наблюдается высокая зашумленность полезного сигнала, обусловленная, преимущественно, дробовым шумом. Результаты экспериментов демонстрируют, что основную роль в ухудшении качества получаемых спектрограмм при низких уровнях сигнала играет дробовой шум. Для обеспечения приемлемого качества сигнала необходимо обеспечить уровень мощности обратного отражённого излучения не менее минус 35 дБм.

#### *Список литературы*

- [1] J. T. Heineck et al. // Journal of Visualization Sept. 2002, Volume 5, Issue 3, pp 233-241.
- [2] Yan YE et al. // Chinese journal of high pressure physics, 2009, 23(6): 471-475.

**В.Г. КАМЕНЕВ, Н.А. КАМЕНЕВА**

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова  
(ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ZEMAX И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ**

В докладе описывается система для регистрации цифровых голограмм, основанная на использовании телецентрической оптики. Предложена оригинальная схема, основанная на использовании двух телецентрических подсистем. Приводятся результаты исследования характеристик оптической системы с телецентрическим ходом лучей, предназначенной для регистрации цифровых голограмм. Результаты моделирования в среде проектирования ZEMAX предложенной системы и её экспериментальная отработка подтверждают требуемые характеристики.

**V.G. KAMENEV, N.A. KAMENEVA**

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **MODELING WITH ZEMAX AND EXPERIMENTAL TESTING TELECENTRIC SYSTEM FOR DIGITAL HOLOGRAM REGISTRATION**

The report describes a system for digital holograms registration based on telecentric optics. An original scheme based on the use of two telecentric subsystems is proposed. The research results of the characteristics of the telecentric optical system intended for recording digital holograms are presented. The simulation results in the ZEMAX design environment of the proposed system and its experimental testing confirm the required characteristics.

Для регистрации дисперсной фазы во время ударно-волнового нагружения оптическая система должна обеспечивать перенос голограммы без искажения пропорций и с одинаковым оптическим увеличением в пределах глубины регистрируемой области. Данный эффект обеспечивается в телецентрических системах.

Телецентрические системы содержат два компонента: телепозитив (фокусирующий компонент, формирующий изображение) и теленегатив (компонент, компенсирующий перспективу). Два данных компонента

располагают так, чтобы задний фокус телепозитива был совмещен с передним фокусом теленегатива.

Поскольку данная система предназначена для газодинамических опытов, существует необходимость в наличии в системе уничтожаемого узла, располагаемого в непосредственной близости от исследуемого объекта, и сохраняемого узла, расположенного в защищенном помещении.

Для анализа телецентрического эффекта в среде проектирования ZEMAX была создана решетка  $3 \times 3 \times 3$ , в узлах которой располагались точечные источники излучения. Была смоделирована телецентрическая система, состоящая из двух телецентрических подсистем – подсистемы увеличения и подсистемы переноса. Область источников излучения, а также области построения промежуточного и конечного изображений были просканированы с помощью прямоугольного детектора. Также была рассчитана ФРТ для промежуточного и конечного изображений.

Результаты моделирования показали, что изображения точечных источников переносятся с одинаковым оптическим увеличением. В изображениях не наблюдаются дисторсия и кривизна поля зрения. Однако по сравнению с исходным источником происходило сильное растяжение промежуточного изображения вдоль оптической оси. Данный эффект характерен для телецентрических систем [1]. Конечное изображение, по сравнению с промежуточным, было сжато в 4 раза вдоль оптической оси.

В серии экспериментальных исследований оптической системы вместо исследуемого объекта устанавливалась мира ГОИ №1. При смещении миры происходит потеря резкости, однако размер изображения остается тем же – таким образом достигается телецентрический эффект.

Вторая серия экспериментальных исследований была посвящена получению и анализу ЧКХ оптической системы. График ЧКХ показывает, что динамический диапазон системы позволяет регистрировать объекты с контрастом до 0,025, следовательно, разрешения системы достаточно для передачи интерференционной структуры. Однако пространственные частоты, лежащие в интервале 150-200 штр./мм, передаются со слабым контрастом (менее 0,1), следовательно, периферийные интерференционные кольца могут быть не зарегистрированы в голографическом изображении.

#### *Список литературы*

[1] Sorenson D. S. et al. Ejecta Particle-Size Measurements in Vacuum and Helium Gas using Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography // LA-UR-14-24722 2014-06-2.

**И.А. КАНЬШИН**

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова  
(ФГУП ВНИИА), Москва, Россия*

## **МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭМИТТАНСА ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В НЕЙТРОННЫХ ТРУБКАХ**

В докладе представлен бесконтактный метод измерения эмиттанса в отпаянных нейтронных трубках. Получение результата с помощью данного способа требует гораздо меньше времени по сравнению с тем, что затрачивается на измерение эмиттанса щелевыми эмиттансометрами. Представлена верификация метода путем сравнения с результатами измерения эмиттанса щелевым эмиттансометром.

**I.A. KANSHIN**

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **CHARGED PARTICLES BEAM EMITTANCE MEASUREMENT METHOD IN NEUTRON TUBES**

The report presents a non-contact method for measuring the emittance in sealed neutron tubes. Obtaining a result using this method requires much less time compared to slit-emittance measuring methods. The verification of the method is presented by comparing with the results of emittance measuring method based on slits and screens.

Использование пучков заряженных частиц находит широкое применение в науке и технике, например, в нейтронных трубках (НТ), к основным техническим характеристикам которых относятся величина потока нейтронов и ресурс работы. Стабильность указанных характеристик зависит, в том числе, от параметров пучка заряженных частиц, экстрагируемого из плазменного источника (ПИ) НТ, в частности, от степени его согласованности с ускоряющей системой (УС) изделия.

Параметром, определяющим согласованность/рассогласованность пучка с УС НТ, является его эмиттанс на выходе из ПИ, характеризующий разброс частиц пучка по поперечным (тепловым) скоростям, что определяет его начальную расходимость [1]. По известной величине эмиттанса пучка на выходе из ПИ определяется его траектория в УС и выявляется факт их согласованности либо рассогласованности. В этой связи актуальной является задача экспериментального определения эмиттанса пучка как на этапах

стендовых исследований при разработке НТ, так и на этапах макетирования готовых (отпаянных) изделий.

Большинство методов измерения поперечного эмиттанта корпускулярного потока являются контактными (щелевые эмиттансометры, «*pepper-pot*» сканеры). При использовании таких методов на пути пучка размещаются диагностические элементы, которые «сканируют» площадь поперечного сечения пучка и выделяют отдельные лучи для последующего построения фазовой диаграммы. Поэтому такие методы не предназначены для отпаянных приборов, в частности, для НТ.

В настоящей работе рассмотрен бесконтактный метод определения эмиттанта, основанный на вычислении его значения  $\epsilon$  и параметров Твисса ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – параметров) [1]. Его суть заключается в последовательном измерении размеров пучка  $r_i$  по ходу его движения вдоль оси  $Z$  от плоскости вычисления эмиттанта и минимизации разницы между теоретически рассчитанным и экспериментально определенным половинным размером пучка (рис. 1). В результате строится фазовая диаграмма, получающаяся из уравнения эллипса  $\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \epsilon$ , коэффициентами которого являются параметры Твисса. Измерение поперечных размеров пучка  $r_i$  в плоскостях  $XZ$  выполнялось посредством фоторегистрации следа ускоренных ионов, что является особенностью представленного способа измерения эмиттанта.

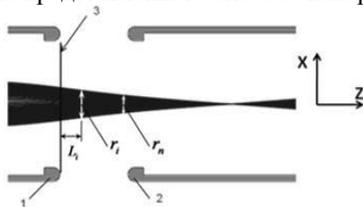


Рис. 1. Принцип измерения эмиттанта корпускулярного потока методом градиентов поперечных профилей: 1 – ПИ, 2 – ускоряющий электрод УС, 3 – плоскость вычисления эмиттанта пучка  $\epsilon_0$  (частный случай – плоскость выходной апертуры ПИ) и параметров Твисса  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$

В результате применения метода градиентов поперечных профилей были получены значения параметров Твисса и эмиттанта пучка, которые были сопоставлены с результатами, полученными ранее с использованием того же ПИ в аналогичных условиях его функционирования посредством эмиттансометра, состоящего из щелей и экранов. Полученные результаты находят качественное согласие.

#### Список литературы

[1] Holste K. et al. // IEPС. 2013 191. p. 14.

**М.А. КАРПОВ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова  
(ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ЗАТВОРЫ С КОНТРАСТОМ 1:1000 И СУБМИКРОСЕКУНДНЫМ ВРЕМЕНЕМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ**

Представлены предварительные результаты применения широкоапертурных электрооптических затворов на основе новых анизотропных твердотельных и жидких кристаллов с контрастом более  $10^3$  и разрешающей способностью более 200 штр/мм, адаптированных для использования с полнокадровыми ПЗС матрицами диагональю 35 мм.

**M.A. KARPOV**

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **ELECTRO-OPTIC SHUTTERS WITH 1:1000 EXTINCTION RATIO AND SUBMICROSECOND SWITCHING TIME**

Preliminary results with using of wide-aperture electro-optical shutters are present. Shutters based on new anisotropic solid-state and liquid crystals with a contrast of more than  $10^3$  and a resolution of more than 200 lines/mm adapted for use with 35-mm fullframe CCD sensors.

Традиционные оптические затворы, использующиеся в газодинамических экспериментах, построены либо на принципе перекрытия пучка механическими шторками или зеркалами, либо на использовании в качестве затвора электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Механические затворы имеют задержку срабатывания, джиттер и экспозиции порядка сотен микросекунд. ЭОП хотя и обеспечивают эти характеристики в наносекундном диапазоне, но имеют предельную разрешающую способность (при контрасте 3-5 %) порядка 50-60 штрихов/мм. Для регистрации объектов микронных размеров на больших полях зрения порядка  $10 \text{ см}^2$  с наносекундными экспозициями требуется применение ЭОП с диаметром фотоприемной площадки от 6 см для сохранения информационной емкости изображения. ЭОП с такой площадью фотокатода чрезвычайно сложны и дороги в производстве. Одной из альтернатив ЭОП является использование

твердотельных электрооптических и жидкокристаллических затворов [1-3].

Изготовлена партия новых электрооптических затворов с четвертьволновым напряжением 300В и коэффициентом экстинкции более  $10^3$  (рис. 1) и на их основе разработан прототип съемочной системы (рис. 2). Получено четырехкадровое изображение динамики лазерного инициирования ВВ (рис. 3).

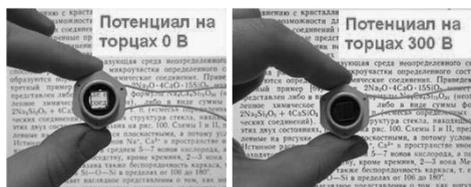


Рис. 1. Образцы новых кристаллов и электрооптических затворов.

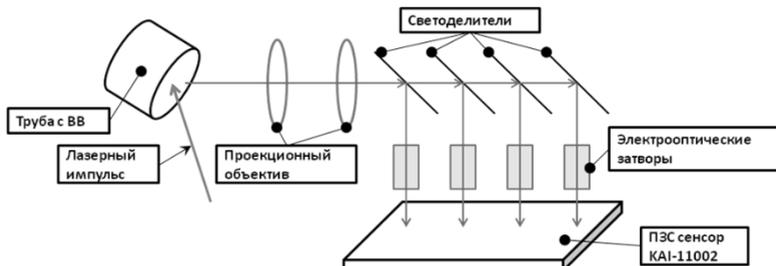


Рис. 2. Схема съемки с использованием одной ПЗС матрицы и четырех электрооптических затворов.

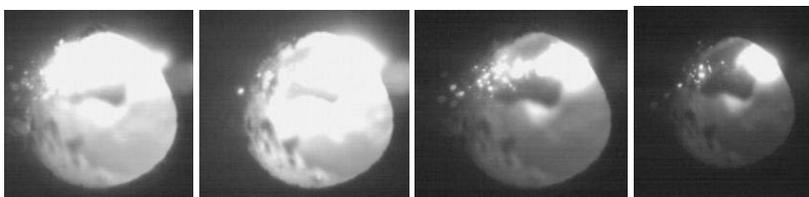


Рис. 3. Четыре последовательных кадра с экспозицией каждого 100 нс и интервалом между ними 1 мкс.

#### Список литературы

- [1] L.M. Ireland // Optics Communications, Volume 27, number 3 December 1978.
- [2] Elliott R.A., Shaw J.B. // Applied Optics, 1979 Vol. 18, No. 7.
- [3] Geis M. W et al. // Proc. SPIE 7618: 76180J/1-5 (2010).

М.А. КАРПОВ, Н.А. КЛЕОПОВА, С.А. ЗАТОЛОКИН  
*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.  
Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **РЕГИСТРАТОР КАДРОВЫХ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ЭКСПОЗИЦИЕЙ ОТ 5 НС ДЛЯ ДИАПАЗОНА ОТ 0,01 ДО 300 КЭВ**

Представлены результаты лабораторных исследований нового малогабаритного рентгенографического регистратора с размером приемной области  $\varnothing$  4 см в диапазоне от 0,03 до 300 кэВ с предельной однофотонной чувствительностью для получения импульсных радиографических изображений с экспозицией от 5 нс.

M.A. KARPOV, N.A. KLEOPOVA, S.A. ZATOLOKIN  
*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **DIRECT CONVERSION X-RAY FRAMING CAMERA WITH 5 NS GATIE TIME AND 0.01 TO 300 KEV SPECTRAL SENSITIVITY**

The results of laboratory studies of a new compact radiographic camera with a receiving area of  $\varnothing$  4 cm in the range from 0.03 to 300 keV with extreme single-photon sensitivity for obtaining pulsed radiographic images with an exposure of 5 ns are presented.

Новый регистратор радиографических изображений РРИ-01 представляет собой переносной малогабаритный цифровой регистратор изображений для мягкой и средней рентгеновской области, а также вакуумного ультрафиолета (от  $\sim 10$  эВ до 300 кэВ) с выводом изображения на компьютер оператора в режиме реального времени и возможностью производить съемку с экспозицией от 3 с до  $5 \times 10^{-9}$  с (5 нс) по сигналу внешнего запуска. Габариты регистратора составляют  $120 \times 120 \times 120$  мм, масса без свинцового экрана 900 г. Внешний вид регистратора представлен на рисунке 1.

Лабораторные исследования характеристик регистратора проводились в теновом режиме съемки излучением от рентгеновского источника «Сарма-300». При испытаниях была использована трансмиссионная геометрия съемки (рисунок 2).

На рисунке 3 представлены радиографические изображения различных объектов, полученных регистратором в одноимпульсном режиме съемки за время экспозиции длительностью 5 нс.



Рис.1 Регистратор радиографических изображений РРИ-1

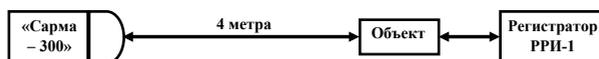


Рис.2 Геометрия съемки

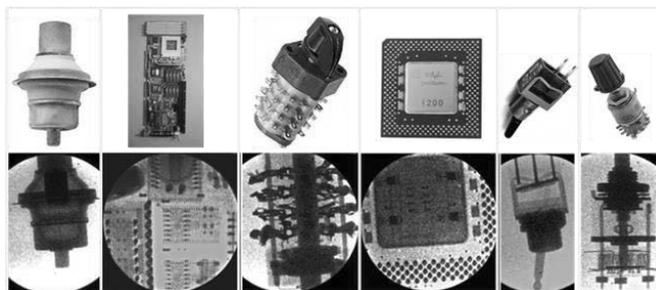


Рис. 3. Радиографические одноимпульсные изображения, полученные регистратором.

Высокая чувствительность регистратора позволила применить его при исследовании явлений вынужденного комбинационного и антистоксового рассеяния лазерного излучения в УФ диапазоне [1,2].

*Список литературы*

- [1] Karpov M.A. et al. // "Laser Ultrasonics 2018", 2018, University of Nottingham, UK.
- [2] Земсков К.И. и др. // X межд. конф. «Фундаментальные проблемы оптики», 2018 г., СанктПетербург.

М.А. КАРПОВ<sup>1</sup>, Н.В. ЧЕРНЕГА<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

*<sup>2</sup>ФГБУН ФИАН, Москва, Россия*

## **О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ПЕРЕНОСНОЙ СИСТЕМЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ГОЛОГРАФИИ И МИКРОТОМОГРАФИИ**

Разработаны и экспериментально исследованы характеристики малогабаритного переносного твердотельного источника направленного рентгеновского излучения на основе синтетических опаловых матриц. Полученные результаты позволяют предполагать наличие на выходе из синтетической опаловой матрицы когерентного (либо частично-когерентного) излучения рентгеновского диапазона. Такой источник в комплексе с цифровым регистратором рентгенографических изображений может быть использован в малогабаритных переносных системах фазоконтрастной рентгенографии для исследования эффектов пыления с субмикронным разрешением в газодинамических экспериментах.

М.А. KARPOV<sup>1</sup>, N.V. TCHERNEGA<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA), Moscow, Russia*

*<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia*

## **ON THE POSSIBILITY OF CREATING A PORTABLE SYSTEM OF X-RAY HOLOGRAPHY AND MICROTOMOGRAPHY**

The characteristics of a small-body portable solid-state X-ray source based on synthetic opal matrices have been developed and experimentally investigated. The results obtained suggest the existence of coherent (or partially coherent) X-ray radiation at the output of the synthetic opal matrices. Such a source in combination with a digital recorder of X-ray images can be use in small-sized portable systems of phase-contrast X-ray diffraction imaging systems to study of ejecta effects with submicron resolution in gasdynamic experiments.

В современных газодинамических исследованиях большое внимание уделяется исследованию эффектов пыления, возникающих при выходе ударной волны на границу раздела «поверхность-вакуум» и «поверхностьгаз». Оптические системы регистрации процессов пыления обладают невысокой просвечивающей способностью, вследствие чего на полученных изображениях удается наблюдать только частицы,

находящиеся на фронте пылевого облака. Использование рентгеновских методов существенно повышает просвечивающую способность систем регистрации, однако невысокий динамический диапазон и разрешающая способность, а также тормозной характер излучения просвечивающего пучка не позволяют различать на полученных изображениях частицы с характерными размерами десятки микрон и менее.

Одним из методов повышения разрешающей способности рентгеновских систем регистрации является использование когерентного рентгеновского излучения и, соответственно, фазоконтрастной рентгенографии (ФКРГ). Методы ФКРГ позволяют визуализировать на рентгенографических изображениях объекты с характерными размерами менее микрометра [1-4], однако, в настоящее время в качестве источника когерентного рентгеновского излучения используется синхротронное излучение, что в принципе не предполагает какой-либо мобильности и малогабаритности таких комплексов, а стоимость их обслуживания составляет от 1 миллиона рублей в день.

Ранее нами были представлены результаты исследований по генерации направленного рентгеновского излучения из наноструктурированных опаловых матриц, а также результаты разработки малогабаритного цифрового регистратора радиографических изображений [5-6]. Полученные результаты по получению когерентного рентгеновского излучения в комплексе с цифровым регистратором рентгенографических изображений могут быть использованы при создании малогабаритных переносных систем фазоконтрастной рентгенографии для исследования характеристик эффектов пыления с субмикронным разрешением в газодинамических экспериментах.

#### *Список литературы*

- [1] Kim H.T. et al. // Appl. Phys. Lett. 98, 121105 (2011).
- [2] Trebes J.E., Brown S.B., Campbell E.M. et al. // Science, 1987;238(4826):517-9.
- [3] Stickler D. et al. // Appl. Phys. Lett. 96, 042501 (2010).
- [4] Sandberg R. L. // Opt. Lett., vol. 34, 2009, pp. 1618–1620
- [5] Альмохамед Я. и др. // Письма в ЖЭТФ, 2015, Т. 101, С. 399-404 [6] Карпов М.А. и др. // XX Харитоновские чтения, Саров, 17-20 апреля 2018 г.

Я.А. КОКОРЕВ, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА, ВОССТАНОВЛЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

В данной работе рассмотрена возможность определения активационными детекторами спектральных характеристик поля нейтронов, создаваемых импульсным нейтронным генератором. Разработана и реализована методика проведения измерений с помощью пороговых детекторов из меди и алюминия и экрана из кадмия. Показано, что выход нейтронов в пределах погрешности совпадает с показаниями аттестованного дозиметра-радиометра.

Y.A. KOKOREV, R.F. IBRAGIMOV, E.V. RYABEVA

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

## **SPECTRAL CHARACTERISTICS OF NEUTRON FLUX OF A PULSE GENERATOR RESTORED BY ACTIVATING DETECTORS**

The possibility of determining by the activation detectors the spectral characteristics of the neutron field generated by a pulsed neutron generator is considered. A technique for measuring with the help of threshold detectors made of copper and aluminum and a screen made of cadmium has been developed and implemented. Neutron yield within the error coincides with the testimony of a certified dosimeter-radiometer.

В данной работе изучался процесс регистрации нейтронного излучения с энергией 14 МэВ с помощью набора активационных детекторов [1].

Источником нейтронов является импульсный нейтронный генератор ИНГ-07Т, работающий на базе реакции  $d(t,\alpha)n$  в результате которой образуются нейтроны с энергией 14 МэВ.

Список использованных активационных детекторов и их характеристики приведены в таблице 1 [2]. Детекторы имеют форму пластины толщиной 1 мм квадратного сечения площадью 1 см<sup>2</sup> и 25 см<sup>2</sup> для меди и алюминия соответственно.

Таблица 1. Характеристики активационных детекторов.

Ядерная реакция	Порог реакции, МэВ	$T_{1/2}$ , мин	Энергия $\gamma$ -излучения (эмиссия фотонов, %)
$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	4,0	9,462	1,013 (30) 0,844 (70)
$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	12,8	9,74	0,511 (195)

Детекторы в эксперименте помещались на торец ИНГ-07Т. Расстояние до мишени составило 1,5 см. Мишень генератора является точечным изотропным источником. Генератор размещен в центре блока биологической защиты из полиэтилена толщиной около 1 м. Детекторы помещались в чехол из кадмия толщиной 1 мм для поглощения тепловых нейтронов. Облучение нейтронами происходило в течение 30 мин. По окончании облучения  $\gamma$ -излучение от активационного детектора регистрировалось с использованием  $\gamma$ -спектрометра с детектором на основе особо чистого германия. Доля частиц, попавших на активационный детектор от точечного источника нейтронов, и в  $\gamma$ -спектрометр от пластины вычислялась путем моделирования в среде GEANT4.

Таблица 2. Результаты измерений

Образец	Cu	Cu + Cd	Al	Al + Cd
$\varphi$ , $10^7$ н/с	0,81±0,09	0,57±0,07	1,3±0,3	1,2±0,3

По результатам эксперимента для каждого активационного детектора были получены значения выхода нейтронов от ИНГ-07. Наличие в наборе детектора – пластины из  $^{27}\text{Al}$  позволило показать, что 50 % быстрых нейтронов, регистрируемых детекторами, имеют энергию больше 4 МэВ.

Интегральный выход нейтронов, измеренный с помощью медной пластины и дозиметра-радиометра МКС-1117 совпали в пределах погрешности.

При расширении набора активационных детекторов (детекторами с разными энергетическими порогами) возможно более детальное определение энергетических характеристик нейтронного излучения.

*Список литературы*

- [1] Крамер-Агеев Е.А. и др. Активационные методы спектрометрии нейтронов, 1976 г.
- [2] Севастьянов В.Д. Моделирующие опорные поля нейтронов для метрологического обеспечения нейтронных измерений на ядерно-физических установках РФ. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015, 175 с.

П.И. КОНОВАЛОВ, А.Ю. СОКОЛОВ, А.В. СПАХОВ,  
И.Г. ПРЯНИШНИКОВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.  
Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОГО ЛЕНТОЧНОГО ПУЧКА В КАТОДНОЙ КАМЕРЕ ХРОНОГРАФИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННО- ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

В работе представлено исследование электронно-оптической системы электронно-оптического преобразователя ТПО30-01 с аксиальным электронным пучком, выявлены ее недостатки. Показаны преимущества ленточного пучка, применяемого в приборах такого типа за рубежом. Предложен оригинальный способ создания ленточного пучка в электронно-оптическом преобразователе на основе «пушки Пирса», проведена оценка его эффективности.

P.I. KONOVALOV, A. J. SOKOLOV, A.V.SPAKHOV, I.G.  
PRYANISHNIKOV

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **INVESTIGATION OF A POSSIBILITY OF FORMING A FLAT STRIP ELECTRON BEAM IN THE CATHODE CAMERA OF A STREAK TUBE**

The paper presents a study of the electron-optical system of the ТПО30-01 streak tube with an axial electron beam, and its drawbacks are revealed. The advantages of a strip beam used abroad in devices of this type of are shown. An original method of creating a strip beam in an streak tube based on the “Pierce Gun” was proposed, its effectiveness was evaluated.

В результате моделирования пролета пучка электронов в электроннооптической системе (ЭОС) хронографического электронно-оптического преобразователя (ЭОП) ТПО30-01 [1] выявлено два недостатка этой ЭОС: потери электронов на диафрагмах и образование пространственного заряда высокой плотности в точке кроссовера. Эти факторы являются ограничением такого ключевого параметра ЭОП, как динамический диапазон (ДД) регистрации быстропротекающих процессов. В рамках поиска различных путей увеличения этого параметра был

проведен анализ существующих конструкций ЭОС хронографических ЭОП различных производителей. В обзоре рассматривались ЭОП производства: Photonis (Франция-Нидерланды), Photek Ltd (Великобритания), Hamamatsu Photonics (Япония), Институт XI'AN (Китай), ФГУП «ВНИИА им Н.Л. Духова» (РФ), «ИОФРАН» (РФ), BIFO company (РФ). Как показал проведенный анализ, в большинстве приборов используются электростатические аксиально-симметричные электронно-оптические системы (ЭОС), за исключением некоторых линеек компании Photonis и их аналогов, разработанных в институте XI'AN, в которых используется несимметричная («билламиларная») оптика. Ключевой особенностью такой оптики является формирование плоского ленточного пучка электронов и его фокусировка с кроссовером в одной плоскости при помощи квадрупольных линз. В ЭОП, разработанных в институте XI'AN, применяются дополнительные фокусирующие электроды с подключением высокочастотных полей.

Из всех рассмотренных вариантов наилучшие значения параметров достигнуты в ЭОП с ЭОС, в которой формируется плоский ленточный электронный пучок. При таком пучке электронов пространственный заряд распределяется равномерно, что позволяет обеспечить более высокие значения ДД ЭОП. Также, в приборах компании Hamamatsu достигнуты высокие значения параметров ЭОП за счет использования магнитной фокусировки в аксиально-симметричной ЭОС. Общим недостатком таких ЭОС является высокая сложность и, соответственно, высокая стоимость изготовления прибора. Это связано с тем, что для фокусировки электронов в этих системах необходимы такие сложные в изготовлении элементы как квадрупольные, магнитные линзы или линзы с ВЧ-фокусировкой.

В других областях электронной оптики известны более простые электростатические линзы, позволяющие формировать плоский не расходящийся поток электронов, так называемые «пушки Пирса» [2].

Авторами предложено применение конструкции «пушки Пирса», как элемента ЭОС хронографического ЭОП. При такой конфигурации ЭОС потери электронов на диафрагмах могут быть минимизированы, а пространственный заряд, образованный при пролете электронов, значительно меньше наблюдаемого в ТПО30-01. Предложенное решение позволит обеспечить высокие значения ДД хронографического ЭОП при максимально простом его исполнении.

#### *Список литературы*

[1] [www.vniia.ru/production.incl](http://www.vniia.ru/production.incl)

[2] Pierce J.R. Theory and design electron beams, Nostrand company, inc, London,1954, 215 p.

А.И. МАКСИМКИН, Е.Г. БЕЛЕНДРЯСОВА, Е.М. КУДРЯВЦЕВ,  
А.Н. АБЛЕЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ТВЭЛАХ**

Рассмотрен вариант использования вихретокового метода контроля для локального поиска дефектов в оболочках твэлов реакторов типа БН. Особые требования основываются на необходимости реализации комплекса установок по исследованию твэл, действующих по принципу экспресс теста. Методом успешно обнаружены поверхностные, внутренние дефекты и дефекты с внутренней стороны оболочки. Создана экспериментальная установка вихретокового контроля твэлов.

A.I. MAKSIMKIN, E.G. BELENDRYASOVA, E.M.  
KUDRYAVTSEV, A.N. ABLEEV

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

## **FEATURES OF THE APPLICATION OF THE EDDY CURRENT TESTING METHOD FOR LOCAL DETECTION OF DEFECTS IN FUEL RODS**

An applying of the Eddy Current Testing method for local search for defects in fuel rod cladding of BN type reactors is considered. Special requirements are based on the necessity to implement a series of installations for the study of fuel rods which are based on the principles of the express test. The method successfully detected surface, internal defects and defects on the inner side of the shell. An experimental installation of eddy current fuel rods has been created.

Проблема развития существующих и создания новых методов и средств контроля технического состояния и диагностики элементов конструкций АЭС будет всегда оставаться актуальной ввиду развития требований по безопасности и увеличения сроков службы.

Работа направлена на разработку и внедрение вихретоковых методов контроля технического состояния оболочек твэлов реакторов типа БН для исследования в режиме экспресс теста как на этапе производства и так для послереакторных исследований.

Физический принцип вихретокового метода контроля имеется возможность варьировать зону контроля по глубине проникновения поля, которая определяется, как описано в статье [1], по формуле скин-слоя:  $f = 1/(\pi\mu\sigma\delta^2)$ .

Можно охватить всю толщину металла оболочки (трубка с толщиной стенки 0,4 мм; марка нержавеющей стали – ЧС-68) твэла БН-600 в диапазоне частот от 1,2 до 8 МГц. Таким образом, вихретоковым методом можно проводить обнаружение поверхностных трещин внутренней стороны оболочки твэла, что подтверждено экспериментально.

В нашем случае проводится исследование параметров дефектов в локальной области в отличие существующих методик. Поэтому применяется вихретоковый преобразователь по типу «подкова», подробный описанный в статье [2]. Вид расчетной модели в среде представлен на рисунке 1.

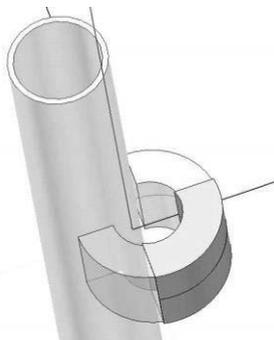


Рис. 1. Вид расчетной модели вихретокового преобразователя по типу «подкова»

Проведенные предварительные испытания показывают соответствие расчетной модели реальным условиям. Ведется изготовление экспериментального стенда вихретокового контроля твэл.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Соглашение № 14.578.21.0258, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57817X0258.

#### *Список литературы*

- [1] Tian G.Y., Sophian A. //NDT and E International. Vol. 38, Issue 1, P. 77-82 (2005)..
- [2] Auld B.A., Moulder J.C. // Journal of Nondestructive Evaluation Vol. 18, Issue 1, P.3-36 (1999)

**С.П. МАСЛЕННИКОВ, А.С. СЕРЕБРЯКОВА**

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **СОСТАВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КОММУТАТОРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Представлены результаты работ по созданию высоковольтных составных коммутаторов на основе последовательно-параллельно включенных модулей МОП-транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором. Коммутаторы обладают возможностью увеличения рабочих напряжений и коммутируемых токов путем их масштабирования и могут быть использованы в схемах генераторов импульсов микросекундного диапазона длительностей.

**S.P. MASLENNIKOV, A.S. SEREBRYAKOVA**

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

## **COMPOSITE SEMICONDUCTOR SWITCHES FOR HIGH- VOLTAGE MICROSECOND PULSE GENERATORS**

The results of research work on the development of high-voltage composite switches based on series-parallel connected MOSFET and IGBT modules are presented. The switches have the ability to increase the operating voltages and switching currents by their scaling and can be used in circuits of high-voltage microsecond pulse generators.

Высоковольтные коммутаторы с рабочими напряжениями до нескольких десятков киловольт и наносекундным быстродействием образуют обширный класс приборов силовой электроники, который востребован в области разработки импульсного электрофизического оборудования различного назначения. Для многих практических применений задачи коммутации высоких напряжений в импульсных схемах-формирователях могут решаться с помощью составных твердотельных коммутаторов, построенных на основе последовательно и параллельно соединенных однотипных транзисторных модулей.

В настоящей работе суммированы результаты исследований, направленных на разработку высоковольтных полупроводниковых коммутаторов для применения в выходных каскадах одно- и двухтактных импульсных генераторов микросекундного диапазона длительностей. Составные коммутаторы построены на основе цепочки последовательно

соединенных транзисторных модулей, каждый из которых включает в себе собственную схему управления (СУ) и силовой транзистор (рис.1).

Коммутаторы обладают возможностью увеличения рабочих напряжений и коммутируемых токов путем их масштабирования и могут быть использованы в микросекундных импульсных схемах с широким диапазоном выходных характеристик.

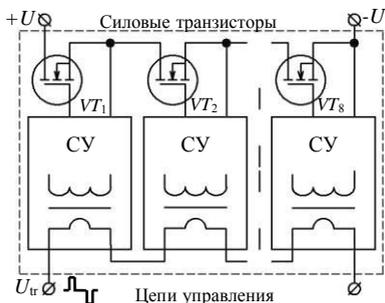


Рис. 1. Структура твердотельного высоковольтного коммутатора

Для управления составными коммутаторами используются трансформаторные импульсные схемы, допускающие плавную регулировку длительности открытого состояния ключей и обеспечивающие их устойчивое переключение с наносекундным быстродействием. Одновременное переключение транзисторных модулей происходит под действием последовательности коротких ( $\sim 0,5$  мкс) разнополярных импульсов отпирания и запираения, которые формируются с временной привязкой к фронту и спаду внешнего синхроимпульса и передаются на схемы транзисторных модулей через импульсные трансформаторы с гальванической развязкой на полное рабочее напряжение [1,2].

Разработанные составные коммутаторы на последовательно соединенных МОП-транзисторах обладают наносекундными временами переключения при напряжениях до 10 кВ и импульсных токах до 12 А. В результате испытаний коммутаторов, выполненных при их эксплуатации в составе импульсных модуляторов СВЧ-приборов, была продемонстрирована стабильность их работы в диапазоне длительностей импульсов 2 – 500 мкс и эквивалентных сопротивлений нагрузок  $10^3 - 10^7$  Ом.

#### Список литературы

- [1] Масленников С.П., Серебрякова А.С. // Радиотехника и электроника. 2018. № 1. С. 80-84
- [2] Масленников С.П. и др // Вестник НИЯУ МИФИ, 2018, Т.7, №2, С. 175–180

**И.С. МАСЛЕННИКОВА, В.В. ЛЫКОВ, С.В. КОЛПАЧКОВ**  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИСПЫТАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Представлены результаты испытаний различных видов аналого-цифровых преобразователей, приемопередатчиков и синтезаторов частот на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц космического пространства. Выполнена оценка пороговых значений линейной передачи энергии возникновения одиночных радиационных эффектов.

**I.S. MASLENNIKOVA, V.V. LYKOV, S.V. KOLPACHKOV**  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia*

## **STABILITY TESTS OF THE INTEGRATED CIRCUITS TO THE EXPOSURE TO HEAVY IONS**

This article presents the results of stability tests types of analog-to-digital converters, transceivers, and frequency synthesizers to the exposure to heavy ions of space. The level of this type of threshold value linear energy transfer the occurrence of single event effects.

Повышение устойчивости интегральных микросхем к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства (КП) является одной из главных проблемных задач, которую решают разработчики космической электроники. При проектировании и производстве электронной компонентной базы (ЭКБ) для космических применений должны быть проведены испытания на все виды одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) в диапазоне рабочих температур и различных электрических режимах. В то же время в некоторых случаях разработчики радиоэлектронной аппаратуры для космических аппаратов применяют ЭКБ, не содержащую информацию о чувствительности к ОРЭ.

Испытания должны проводиться в режимах применения микросхем в аппаратуре. Чаще всего испытания проводят только для одного значения линейной передачи энергии (ЛПЭ), которое пересчитывается исходя из требований к сроку активного существования, орбиты, или задается в технических требованиях на аппаратуру. ЭКБ, которые не отвечают требованиям, должны быть заменены или применены дополнительные

методы обеспечения стойкости. Зная характеристики ЭКБ в аппаратуре, разработчик РЭА может указать критические типы эффектов, определяющие работоспособность аппаратуры, и установить требования к этим эффектам. Чаще всего это тиристорные эффекты и связанные с ними катастрофические отказы, пробой подзатворного диэлектрика и эффекты выгорания в ЭКБ с высоким напряжением питания.

Испытания ЭКБ были проведены на испытательных средствах по контролю стойкости к воздействию ТЗЧ КП, созданных филиалом АО «ОРКК» – «НИИ КП» и расположенных в г. Дубна (Московская область, Россия) на базе циклотронов ЛЯР ОИЯИ У-400М и У-400 [1]. Оборудование, использованное во время испытательных сессий, позволяет облучать объект с энергиями ионов от 3 до 23 МэВ/нуклон в диапазоне потока частиц от 10 до  $10^5$  ( $\text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ ). Объекты облучались ионами с ЛПЭ от 6,34 до 69,2 МэВ $\times$ см<sup>2</sup>/мг. Список использованных ионов со значением ЛПЭ и диапазоном в Si приведен в таблице 1. Поток ионов выбирался в зависимости от чувствительности объекта испытаний к ОРЭ. Испытания проводились в вакууме с остаточным давлением от 1 до 10 мм рт. ст. Размер пучка составлял 200 на 200 мм. Система мониторинга характеристик пучка и большое количество разъемов на задней стороне вакуумной камеры позволяют одновременно облучать несколько образцов в различных режимах работы с оперативным контролем характеристик при облучении.

Таблица 1. Параметры пучков ионов

Ион	Энергия на поверхности образца, МэВ/нукл.	ЛПЭ (Si), МэВ $\times$ см <sup>2</sup> /мг	Пробег, R (Si), мкм
<sup>132</sup> Xe	20,10	43,93	210,50
<sup>132</sup> Xe	3,90	69,20	42,50
<sup>84</sup> Kr	22,90	19,80	295,90
<sup>84</sup> Kr	3,11	40,60	34,40
<sup>40</sup> Ar	3,70	15,38	39,04
<sup>22</sup> Ne	3,40	6,34	42,34

Полученные результаты испытаний позволяют разработчикам радиоэлектронной аппаратуры сделать вывод о соответствии испытанных устройств заданным требованиям и возможности их применения. Устройства с аналогичной функциональностью могут показывать весомые различия в чувствительности к ОРЭ, даже если они из одной серии.

*Список литературы*

[1] Anashin V.S. et al. // 15th Eur. Conf. on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Sep. 2015. p.215.

С.П. МОРЕВ<sup>1,2</sup>, А.Н. ДАРМАЕВ<sup>1</sup>, Д.А. КОМАРОВ<sup>1</sup>,  
К.В. КУЗЬМИЧ<sup>1</sup>, С.П. МАСЛЕННИКОВ<sup>2</sup>, Э.К. МУРАВЬЕВ<sup>1</sup>, В.М.  
САБЛИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО Научно-производственное предприятие «Торий», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОЭМИССИОННЫХ СТРУКТУР В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ТОКА В ВАКУУМНЫХ СВЧ ПРИБОРАХ**

Обсуждена возможность применения планарно-торцевых автоэмиссионных структур для создания электронно-оптических систем мощных СВЧ приборов. О типах, представлены результаты теоретического и экспериментального анализа.

S.P. MOREV<sup>1,2</sup>, A.N. DARMAEV<sup>1</sup>, D.A. KOMAROV<sup>1</sup>,  
K.V. KUZMICH<sup>1</sup>, S.P. MASLENNIKOV<sup>2</sup>, E.K. MURAVIEV<sup>1</sup>,  
V.M. SABLIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research and Production Enterprise "TORIY", Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia

## **ABOUT POSSIBILITY OF APPLICATION OF FIELD EMISSION STRUCTURES AS CURRENT SOURCES IN VACUUM MICROWAVE DEVICES**

The possibility of the use of planar-edge field emission structures for development of electron-optical systems of vacuum microwave devices is discussed, the results of theoretical and experimental analysis are presented.

Первые образцы СВЧ приборов, использующих автокатоды (фемитроны), появились в 1958 г. Однако из-за возможности получать гораздо более высокие параметры приборов на термокатодах работ в этом направлении были прекращены. Интерес к приборам с автоэмиссией возобновился после публикаций работ Ч. Спиндта. Первоначально значительное количество публикаций (достаточно посмотреть на материалы конференций IVES и IVESC за период 1980-2019гг.) было посвящено исследованию различных аспектов формирования структур, включающих матричные катоды, лезвийные катоды или нанотрубки, затем, начиная с 2004 г., появились публикации о создании образцов ЛБВ с выходной мощностью порядка 45 Вт в диапазоне 4 ГГц.

В докладе представлены материалы теоретических и экспериментального исследования автоэмиссионных структур, обеспечивающих устойчивую эмиссию электронного потока с усредненной плотностью тока  $0,2 \text{ A/cm}^2$  в течении более чем 1000 часов. Экспериментально исследовался макет электронной пушки в которой размещалась одиночная ячейка с катодом из разных материалов. На управляющий, формирующий электроды и анод пушки подавался одинаковый потенциал и, вследствие этого, электронный поток распространялся в эквипотенциальном пространстве.

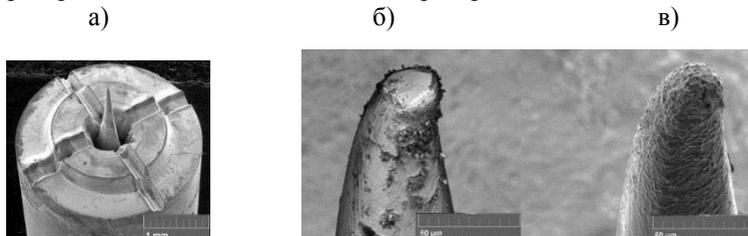


Рис. 1. Вольфрамовый автоэмиссионный катод (а) и фото острия катода до (б) и после (в) проведения экспериментальных измерений

В качестве примера использования автоэмиссионного катода была рассмотрена электронно-оптическая система, включающая в себя тетродную электронную пушку с девятью расположенными в один ряд вольфрамовыми катодами, управляющим и формирующим электродами, а также анодом.

На рис.2 представлен результат расчета ЭОС с автоэмиссионной катодной матрицей в магнитной фокусирующей системе на постоянных магнитах с однородным магнитным полем. Для наглядности верхняя половина пушки и канала транспортировки сделана прозрачной.

Как показали результаты расчетов, электронный поток проходит через прямоугольный канал транспортировки  $0,9 \times 8,0 \text{ мм}^2$  длиной 30мм без потерь.

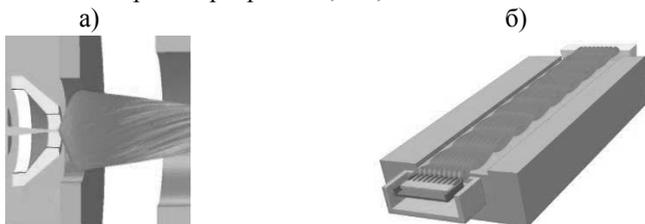


Рис. 2. Фрагмент парциальной пушки (а) и канала транспортировки (б).

А.О. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, О.А. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, В.П. ТРЕБУХ<sup>1</sup>,  
А.С. БРИЕНКОВ<sup>2</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «НПП «Магратеп», Фрязино, М.О., Россия

<sup>2</sup>АО "НПП "Исток" им. Шокина", Фрязино, М.О., Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## **РАЗРАБОТКА МИКРОВОЛНОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Проведен обзор работ, показывающий возможности эффективного использования электромагнитной энергии микроволнового диапазона в процессах вскрытия и обогащения минерального сырья. Рассмотрены результаты создания эффективной микроволновой установки большой мощности для высокоэнергетического воздействия на минеральное сырьё. Представлены результаты работы микроволновой установки в различных технологических режимах.

A.O. MOROZOV<sup>1</sup>, O.A. MOROZOV<sup>1</sup>, V.P. TREBUN<sup>1</sup>,  
A.S. BRIENKOV<sup>2</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Joint-stock Company, "NPP "Magratep", Fryazino, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>Joint-stock company «NPP «ISTOK» named after A.I. Shokin» Fryazino,  
Moscow reg., Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia

## **DEVELOPMENT OF MICROWAVE INSTALLATION FOR EFFICIENT PROCESSING OF MINERAL MATERIALS**

The review of works is presented, showing the possibilities of the effective use of electromagnetic energy of microwave range in the processes of opening and enrichment of mineral raw materials. The results of creating an efficient high-power microwave installation for high-energy impact on mineral raw materials are considered. The results of the microwave installation in various technological modes are presented.

В последнее время в России интенсифицировались работы по исследованию микроволнового воздействия на минеральное сырьё. Цели этих научных исследований достаточно разнообразны: обезвоживание-сушка, интенсификация технологических процессов обогащения руд и рудных концентратов, восстановление дефицитных металлов из техногенных отходов, шламов и отработанных катализаторов.

Проведенные исследования на лабораторных установках малой мощности показывают необходимость создания эффективных промышленных установок для СВЧ-обработки минерального сырья для горнообогатительной промышленности с производительностью более 500 кг/час на выходе из установки.

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» совместно с ЗАО «НПП «Магратеп» в разработана и успешно прошла испытания опытно-промышленная установка для СВЧ высокоинтенсивной тепловой обработки минерального сырья. СВЧ-мощность созданной установки 50 кВт на частоте 915 МГц. Установка работает в непрерывном режиме. Производительность установки по испаренной влаге может достигать 50 литров в час [1]. Режим работы установки определяется теплофизическими характеристиками и начальной влажностью сырья, требуемой рабочей температурой и подводимой СВЧ-мощностью. В установке возможно проведение химических реакций в нагреваемом минеральном материале.

Рабочая камера установки волноводно-проходного типа работающая в режиме бегущей волны выполнена на основе волновода прямоугольного увеличенного сечения (516×304 мм) с волной Н<sub>10</sub>. По центру волновода расположен продуктопровод с обрабатываемым сырьем. Продуктопровод представляет собой толстостенную фторопластовую трубу с внутренним диаметром 135 мм заполненную минеральным сырьем. Степень заполнения продуктопровода не превышает 50%. Сырье в продуктопроводе движется навстречу СВЧ энергии. Такая компоновка позволяет осуществлять эффективную передачу микроволновой энергии нагреваемому материалу [2].

Проведённые исследования работы установки на высоком уровне мощности определили, что производительность может достигать до 320 кг/час, при температуре до 250°C. В настоящее время проводятся работы по внедрению подобной установки на горно-обогатительных и перерабатывающих предприятиях для финишной сушки и удаления связанной влаги из концентратов минерального сырья.

#### *Список литературы*

- [1] Morozov A.O. et al. // Proc. of Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering, 2016, Saratov, Russia. Vol.2., pp 85-89.
- [2] Диденко А.Н. и др. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов. Т. 2. Радиационные технологии. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. с.163.

А.О. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, О.А. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, В.П. ТРЕБУХ А.В.  
ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «НПП «Магратеп», Фрязино, М.О., Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## **РАЗРАБОТКА МИКРОВОЛНОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДЕФРОСТАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Рассмотрены вопросы дефростации минерального сырья, расфасованного в полипропиленовую упаковку. Выполнена оценка производительности установки по дефростации при СВЧ-мощности 50 кВт на частоте 915 МГц. Рассмотрены различные конструкции микроволновой установки и выполнены предварительные расчеты эффективных антенных излучателей для дефростации минерального сырья.

A.O. MOROZOV<sup>1</sup>, O.A. MOROZOV<sup>1</sup>, V.P. TREBUN<sup>1</sup>,  
A.V. PROKOPENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint-stock Company, "NPP "Magratep", Fryazino, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Russia

## **DEVELOPMENT OF MICROWAVE INSTALLATION FOR EFFICIENT PROCESSING OF MINERAL MATERIALS**

The issues of defrosting mineral raw materials packaged in polypropylene packaging are considered. The evaluation of the plant defrosting performance at a microwave power of 50 kW at a frequency of 915 MHz is estimated. Various designs of the microwave installation are considered and preliminary calculations of effective antenna emitters for defrosting mineral raw materials are carried out.

В России одной из самых острых проблем в перерабатывающей промышленности, потребляющей минеральное сырьё, является его дефростация в зимний период. Это связано с обширностью территории, зимними условиями хранения и транспортировки сырья железнодорожным транспортом. На выходе из горно-обогатительных и добывающих предприятий остаточная удельная влажность материала может достигать 20%. К таким материалам относится плавиковый шпат, мел, каменная соль и минеральные удобрения. В современных условиях измельченный материал фасуется в полипропиленовые мешки с грузоподъемностью до 70 кг или полипропиленовые много стропные биг-бэги объемом от 1 м<sup>3</sup> и грузоподъемностью от 300 кг до 3000 кг. Процесс

оттаивания упакованного минерального сырья перед растариванием требует наличие отапливаемых складов, а также значительных энерго- и временных затрат. Материальные затраты на растаривание смёрзшегося сырья особенно существенны в зимне-весенний период. Одним из способов решения проблемы является использование установок по микроволновой дефростации.

В настоящее время микроволновая дефростация активно развивающееся направление в СВЧ-энергетике. Основной сферой применения её является пищевая промышленность, где требуется разморозка плодовоовощного и мясомолочного сырья от температур  $\approx 28$  °С до  $\approx (1 - 2)$  °С и при этом накладываются жесткие условия однородности нагрева. Для минерального сырья условия однородности температур не будут являться основными. Анализ диэлектрических характеристик минералов показывает, что подавляющее большинство минералов относятся к классу «несовершенных» диэлектриков, которые могут объемно поглощать электромагнитную энергию на частотах 915 МГц и 460 МГц. Таким образом, создания микроволнового дефростера для упакованного минерального сырья является актуальной и технически реализуемой задачей.

Выполнены теплофизические оценка процессов оттаивания биг-бега с использованием установки по микроволновой дефростации и в климатической камере с конвективной теплопередачей. Показано, что микроволновая дефростация энергетически эффективнее кондуктивной теплопередачи с поверхности биг-бега. Скорость микроволновой дефростации оказывается в 5-8 раз выше, чем скорость дефростации в климатической камере.

Рассмотрены различные варианты создания установки по дефростации минерального сырья в биг-бегах и показано, что установка камерного типа имеет существенные преимущества перед установкой туннельного типа. В качестве микроволновых излучателей могут служить системы на основе распределенных полосковых линий или щелевых антенн. Коэффициент вывода энергии в таких системах достигает 95%.

Разработан эскизный проект камерной установки по дефростации каменной соли (от температуры  $\approx 16$  °С) в биг-бегах СВЧ-мощностью 150 кВт, работающей от двух магнетронных генераторов на частоте 915 МГц. Такая установка будет дефростировать 15 биг-бег в час ( $\approx 30$  тонн/час). В случае использования шлюзов ввода и вывода возможно организовать непрерывную обработку минерального сырья в установке.

А.О. НЕСТЕРЕНКО, Д.Э. ЭРГАШЕВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОГАММАСЪЕМКИ И СЛОЖНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ИХ ПРИМЕНЕНИЕМ**

Описаны различные методы, примененные при обработке результатов аэрогаммасъемки. Интерполяция с помощью радиальных базисных функций, выбор значения радиуса интерполяции, и его влияние на результат. Построение изолиний по методу шагающих квадратов и выбор шага сетки. Обратная свертка по Ричардсону-Люси и её чувствительность к точности описания импульсной функции спектрометра и к выбору радиуса интерполяции.

A.O. NESTERENKO, D.E. ERGASHEV

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **METHODS OF PROCESSING OF THE RESULTS OF THE AEROGAMMA SURVEY AND THE DIFFICULTIES ASSOCIATED WITH THEIR USE**

Various methods of processing aero-gamma survey data are described. Interpolation using radial basis function, suitable values for the interpolation radius and its effect on the results. Contouring using “marching squares” and selection of the interpolation grid size. Richardson-Lucy deconvolution and its sensitivity to accuracy of description of pointspread function of the spectrometer and to interpolation radius value are shown.

Результаты аэрогаммасъемки местности представляют собой интегральные спектры гамма-излучения, набранные за 1 с на последовательных участках вдоль траектории движения воздушного судна [1]. Облёт участка выполняется галсированием – прохождением параллельными курсами с заданным интервалом между галсами. Обработке подвергаются суммарные скорости счета в энергетических диапазонах, соответствующих пикам полного поглощения, с привязкой по координатам и высоте. Опорные точки распределены по высоте с  $\sigma \sim 3$  м. В пространстве опорные точки распределены равномерно с локальными неоднородностями порядка  $\sim 15$  м.

Собственная импульсная функция спектрометра имеет в первом приближении вид  $f(x,y,h) = \exp(-\mu \cdot L)/L^2$ ,  $L^2 = x^2 + y^2 + h^2$ . В общем случае

зависимость от  $x$  и  $y$  определяется геометрией спектрометра и конструкцией контейнера, в котором находится спектрометр. Линейный коэффициент ослабления  $\mu$  зависит от давления и состава атмосферы, учесть его в каждой точке измерения не представляется возможным. При учете траектории движения воздушного судна реальная импульсная функция должна быть вычислена как свертка собственной импульсной функции спектрометра вдоль траектории за 1 с учётом поворота, крена и тангажа. В работах использовалось первое приближение импульсной функции.

С помощью импульсной функции в каждой точке была вычислена соответствующая скорость счета на средней высоте полета. Приведенные значения скорости счета были интерполированы на прямоугольную сетку по методу радиальных базисных функций [2]. В качестве базисной функции была выбрана гауссиана из-за наличия более широкой вершины возле нуля и более быстрого убывания на больших расстояниях по сравнению с квадратичными функциями. Наиболее подходящие значения радиуса интерполяции лежат в пределах от одного до двух меньшего из значения скорости полета или интервала между галсами. Построение изолиний по методу «шагающих квадратов» на сетке с шагом 5 пикселей не требует дополнительного сглаживания, и может применяться если соответствующее количество вычислений интерполированных значений на стеке столь высокой плотности приемлемо (в работе площадь сетки составляла  $401 \times 401$  точек, время расчета интерполяции чаще всего составляло  $\sim 30$  сек и не превышало 3 мин).

Применение обратной свертки по методу Ричардсона Люси для восстановления исходного поля источников требует весьма точного задания импульсной функции (функции размытия). В общем случае в каждой точке, с учетом скорости, траектории, наклонов воздушного судна и рельефа местности. Дополнительные искажения в обрабатываемые данные вносит размытие, возникающее при интерполяции. Собственная импульсная функция, интерполированная с теми же параметрами, что и исходные данные, позволяет существенно улучшить качество восстановления поля источников с применением обратной свертки.

#### *Список литературы*

- [1] Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, Tech.Rep.Series №323, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1991
- [2] Wright G.B. Radial Basis Function Interpolation: Numerical and Analytical Development, B.S., University of Colorado, 2003.

М.В. ПРОКУРОНОВ, В.Д. СЕВАСТЬЯНОВ, Р.М. ШИБАЕВ, А.В  
ЯНУШЕВИЧ

*ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и  
радиотехнических измерений, Менделеево, Россия*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ  
ИНТРОСКОПОВ С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ  
РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ  
ИСТОЧНИКОВ СМЕШАННОГО БЫСТРОГО  
НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Рассматривается возможность построения интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников смешанного быстрого нейтронного и гамма-излучения. В интроскопе используются координатночувствительные детектор (КЧД) с избирательной регистрацией электронов и протонов. КЧД выполнен на основе сцинтилляционных детекторов с цифровой идентификацией нейтронов и гамма-квантов по форме импульса или черенковских детекторов, который регистрирует только электроны (протоны с высоких энергий). Это и позволяет получать раздельно нейтронное и гамма-изображение.

M.V. PROKURONOV, V.D. SEVASTYANOV, R.M. SHIBAEV, A.V  
YANUSHEVICH

*FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Physico-Technical and Radio  
Engineering Measurements, Mendeleevo, Russia*

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF BUILDING  
INTROSCOPE WITH A CODED APERTURE FOR  
REGISTRATION OF THE IMAGE OF SOURCES OF MIXED  
FAST NEUTRON AND GAMMA RADIATION**

The possibility of constructing introsopes with a coded aperture for the registration of an image of sources of mixed fast neutron and gamma radiation is considered. The introsopes use a coordinate-sensitive detector (PSD) with selective registration of electrons and protons. The PSD is based on scintillation detectors with digital identification of neutrons and gamma quanta in the form of a pulse or Cherenkov detectors, which detects only electrons (high-energy protons). This allows you to get separately neutron and gamma images

В прошлом году исполнилось сорок лет со времени публикации классической работы Fenimore E.E. and Cannon T.M. "Coded aperture

imaging with redundant arrays” в которой был описан метод получения изображения рентгеновских и гамма-источников, получивший название метода кодированной апертуры. Такой гамма-телескоп состоит из коллиматора с кодированной апертурой и КЧД. В коллиматоре имеются отверстия, определенным образом расположенные, каждая из которых строит изображение на поверхности КЧД, подобно камере обскуре, и таким образом формируется теневое изображение. По массиву токов разрешающих элементов КЧД декодируется и восстанавливается изображение гамма-источников.

В настоящее время развитие цифровых электронных систем, АЦП, ПЛИС позволяет проводить параллельную регистрацию сигналов детекторов, их преобразование в цифровую форму и дальнейшую параллельную быструю цифровую обработку этих сигналов. Это позволяет разрабатывать более совершенные модели гамма-интроскопов с кодированной апертурой. Регистрация гамма-изображения осуществляется гамма-интроскопами с кодированной апертурой при наличии фонового излучения, который может быть вызван как гамма-излучением, так и нейтронами. Такие эксперименты могут проводиться при исследовании физических процессов на ускорителях, термоядерных установках. Использование в таком интроскопе сцинтилляционного КЧД с цифровой идентификацией нейтронов и гамма-квантов по форме импульса или черенковского КЧД, который регистрирует только электроны (протоны с высоких энергий), позволяет реализовать возможность избирательной регистрации частиц. А это позволяет рассматривать возможное создание на основе этих КЧД интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников быстрого нейтронного и гамма-излучения в смешанных полях. Для таких экспериментов нужна оптимизация коллиматора, защиты интроскопа, параметров КЧД, а также использование специальных алгоритмов с целью уменьшения фонового излучения и искажений теневого и восстановленного изображения.

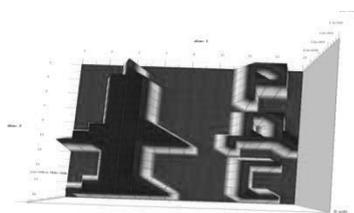


Рис.1. Исходное изображение

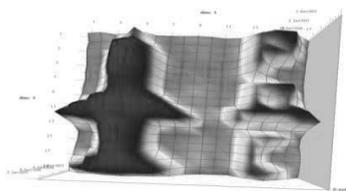


Рис.2 Восстановленное изображение

**Р.С. РАЧКОВ, И.Г. БУСАЙД, С.Э. ШОЛЕНИНОВ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **ЗАЩИТА ФЭУ В БЛОКАХ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СКВАЖИННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Рассмотрена проблема влияния магнитного поля скважины на фотоэлектронные умножители, используемые в блоках детекторов каротажных приборах. Авторами предложен эффективный способ по обеспечению их экранировки. Способ заключается в использовании единого корпуса, в котором расположен сцинтилляционный кристалл и ФЭУ. Результаты расчетов показали, что такой корпус из электротехнической стали обеспечивает требуемый уровень экранировки.

**R.S. RACHKOV, I.G. BUSAYD, S.E. SHOLENINOV**

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **PROTECTION OF FEM IN BLOCKS OF DETECTING OF THE BOREHOLE EQUIPMENT FROM MAGNETIC FIELDS**

The problem of the influence of the magnetic field of the well on the photoelectric multipliers used in the detector blocks of logging devices is considered. The authors propose an effective way to ensure their screening. Method consists in using a casing which is scintillational crystal and a photomultiplier. The results of the calculation showed that such a body of electrical steel provides the required level of shielding.

В настоящее время всё больше внимания уделяется вопросу защищённости ФЭУ в блоках детекторов каротажных приборов от магнитных полей со стороны скважины, уровень которых достигает 100 Э [1-3]. Одной из главных причин возникновения магнитных полей является локальная намагниченность обсадной колонны, которая вызвана воздействием различной магнитной аппаратуры, используемой как для геофизического исследования скважин, так и для контроля состояния самой скважины [2]. Существующие конструкции блоков детекторов обеспечивают экранировку только за счет тонких экранов, обмотанных в несколько слоев вокруг ФЭУ. Данные конструкции не обеспечивают требуемого уровня экранировки. В связи с чем, необходим более совершенный способ защиты.

В работе авторами представлен новый способ по обеспечению экранировки ФЭУ, расположенного в блоке детектора каротажной аппаратуры. Суть способа заключается в использовании в качестве основного экрана единого корпуса, в котором расположен сцинтилляционный кристалл и ФЭУ, изготовленного из магнитного материала.

В качестве материала корпуса рассматривались: сталь 10, электротехническая сталь, пермаллой 79НМ. Для данных материалов были получены зависимости эффективности экранировки от толщины корпуса. Также была рассмотрена комбинация корпуса из электротехнической стали с дополнительным экраном из ленты 79НМ толщиной 0,5 мм, который расположен на внутренней поверхности корпуса (рис. 1).

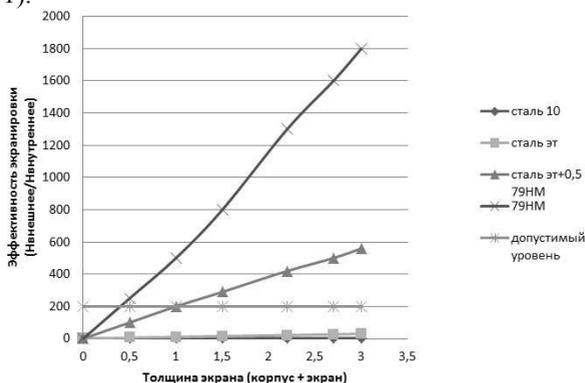


Рис. 1. Зависимость эффективности экранировки от толщины корпуса

Разработанная конструкция блока детектора внедрена в аппаратуру импульсного нейтронного спектрометрического гамма-каротажа (ИНГКС), производимую во ФГУП «ВНИИА». Результаты опытной эксплуатации показали, что в таких приборах отсутствует влияние внешнего магнитного поля на ФЭУ, что обеспечивает стабильность работы аппаратуры и точность измеряемых параметров.

#### Список литературы

- [1] Борисов В.И., Миннуллин И.З. // Каротажник, Тверь, 2016, №6, С. 102-112.
- [2] Рачков Р.С., Пресняков А.Ю. // Ядерная физика и инжиниринг, 2016, Т.7, №2, С. 162-167.
- [3] Смирнов А.В. Научно-техн. вестник «Каротажник», Тверь, 2009, №6, с. 111-117

**М.А. САМОЙЛОВА, А.А. ИВАНОВ, С.Б. ЧЕБЫШОВ**  
*Акционерное общество «Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «СНИИП»), Москва, Россия.*

## **ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ИНЕРТНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ**

Приведено описание работы широкодиапазонного устройства детектирования объемной активности бета-излучающих инертных радиоактивных газов для мониторинга радиационной обстановки на предприятиях ядерно-топливного цикла. Приведены результаты испытаний устройства детектирования с применением радиоактивного газа  $^{85}\text{Kr}$ .

**M.A. SAMOYLOVA, A.A. IVANOV, S.B. CHEBYSHOV**  
*Specialized Scientific Research Institute for Instrumentation Engineering (JSC “SNIP”), Moscow, Russia*

## **RADIOACTIVE NOBLE GASES VOLUMETRIC ACTIVITY MONITOR TESTS**

The operating procedure of volumetric activity of wide-range beta-radioactive noble gases monitor is described. The results of tests with the radioactive gas  $^{85}\text{Kr}$  are shown.

Газоаerosольный выброс из вентиляционных труб является одним из факторов, по которым оценивается влияние АЭС на окружающую среду и подтверждается соответствие выброса требованиям, установленным нормативными документами. Наибольшую долю газоаerosольных выбросов составляют инертные радиоактивные газы (далее – ИРГ), в связи с чем их контролю необходимо уделять особое внимание. Основными трудностями при регистрации объемной активности (далее – ОА) ИРГ являются регистрация низких и высоких активностей, поскольку при малом содержании ИРГ в газовой среде значительно увеличивается погрешность, обусловленная статистикой, а при высоком  $\square$  растет вероятность просчета импульсов от зарегистрированных частиц.

В работе представлено устройство детектирования УДГБ-46Р, предназначенное для мониторинга ОА бета-излучающих ИРГ в широком диапазоне – от  $10^3$  до  $10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup>.

Метод контроля ОА ИРГ заключается в отборе газозоодушнoй пробы из контролируемой зоны, прокачке ее через aerosольный фильтр и подаче

в измерительный объем детектора. Для регистрации ОА ИРГ в широком диапазоне применяются два детектора ионизирующего излучения. В диапазоне низких ОА измерения осуществляются сцинтилляционным детектором. Проба находится в непосредственном контакте с материалом сцинтиллятора, что позволяет регистрировать ОА ИРГ порядка  $10^3$  Бк/м<sup>3</sup>. Сцинтилляции, возникающие в детекторе, регистрируются фотоэлектронным умножителем, после чего преобразовываются в импульсы напряжения и поступают на блок обработки. В диапазоне высоких ОА измерения осуществляются двумя кремниевыми детекторами. В последнем случае высокоактивная проба не соприкасается с материалом детектора, что крайне важно с точки зрения сорбционных свойств блока детектирования. Детектор измерительного канала преобразовывает энергию бета-частиц в электрический заряд, который усиливается и преобразуется в импульс напряжения, после чего подаётся на селектор амплитуды узла обработки и поступает на блок обработки. Для обеспечения возможности регистрации ОА порядка  $10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup> требуется искусственное ограничение потока излучения, падающего на чувствительную поверхность детектора, что достигается благодаря применению коллиматора.

Для подтверждения метрологических характеристик устройства были проведены средовые испытания с применением радиоактивного газа <sup>85</sup>Kr. В соответствии с [1] был собран испытательный стенд, включающий в себя радиометр газов РГБ-07. Нуклид <sup>85</sup>Kr вводили в испытательный контур с помощью специального пенала. Минимальная полученная ОА в испытательном контуре составила  $2,2 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup>. Предельное значение ОА в контуре составило  $1,2 \cdot 10^{12}$  Бк/м<sup>3</sup>. Поскольку максимальная ОА газовой пробы ограничена, для проверки линейности характеристики преобразования детекторов были проведены испытания с использованием набора образцовых источников β-излучения типа 1C0 с нуклидом <sup>90</sup>Sr.

Полученные результаты подтверждают соответствие устройства детектирования требованиям [2].

#### *Список литературы*

- [1] Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений активности нуклидов в бета-активных газах ГОСТ 8.039-79;
- [2] Equipment for continuous monitoring of radioactivity in gaseous effluents - Part 3: Specific requirements for radioactive noble gas monitors.

А.В. САХАРОВСКИЙ, М.П. ВИКУЛИН, А.С. ДОЛОТОВ, П.И.  
КОНОВАЛОВ, А.Б. ПОПУГАЕВ, А.Ю. СОКОЛОВ, А.В.  
ШЕВЧИК

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.  
Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **ХРОНОГРАФИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК- ДИАПАЗОНА**

Исследована возможность разработки хронографического ЭОП с фотокатодом на основе эпитаксиальных гетероструктур GaAs/AlGaAs. Разработана технология активирования и герметизации вакуумного блока хронографического ЭОП. Спроектирована и изготовлена установка финишной сборки. Изготовлены макеты ЭОП и исследованы их параметры.

A.V. SAKHAROVSKIY, M.P. VIKULIN, A.S. DOLOTOV, P.I.  
KONOVALOV, A.B. POPUGAEV, A.Y. SOKOLOV, A.V.  
SHEVCHIK

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **STREAK TUBE FOR VISIBLE AND NEAR INFRARED BAND**

The possibility of development of a streak tube based on epitaxial heterostructures of GaAs/AlGaAs is investigated. The technology of activation and vacuum hermetization is developed. The machine of the finish assembly is designed and manufactured. The models are made and their parameters are investigated.

Ряд методик в моделирующих установках лазерного термоядерного синтеза и некоторые методики исследования ударных волн требуют продления спектрального диапазона чувствительности ЭОП в коротковолновую область ИК-диапазона спектра.

Традиционные фотокатоды, используемые для данных типов ЭОП, ограничивают его спектральный диапазон чувствительности до 900 нм. А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>-материалы обладают более высокой чувствительностью, а также широкой вариативностью диапазона спектральной чувствительности в зависимости от состава материала катода, позволяющей регистрировать излучение в видимом, ближнем и коротковолновом ИК-диапазоне, вплоть до 1,7 мкм при использовании In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As.

Арсенид галлия является базовым и наиболее изученным материалом данной группы. Освоение технологии изготовления ЭОП с фотокатодом данного типа позволит нам построить фундамент для создания новых типов хронографических приборов с продленной спектральной чувствительностью. А такие свойства GaAs, такие как низкое сопротивление и высокая чувствительность, позволяют рассчитывать на увеличение ДД.

В процессе выполнения данной работы была создана технологическая последовательность изготовления хронографического ЭОП с фотокатодом основе GaAs, представляющая собой независимую подготовку и обработку двух составных частей ЭОП фотокатодного и корпусно-экранного узла. Обработка и соединение данных узлов осуществлялось в установке финишной сборки, учитывающей геометрию и конфигурацию прибора и обеспечивающей уровень вакуума, достаточный для достижения требуемых фотоэмиссионных параметров, не более  $2 \cdot 10^{-10}$  мБар.

Фотокатод, представлявший собой комбинацию эпитаксиальных слоев GaAs и AlGaAs суммарной толщиной менее 2 мкм, перенесенных на стеклянное входное окно, подвергался трехступенчатой очистке с целью удаления монослоя мышьяка [1] и активированию цезием и кислородом. Для сборки корпусно-экранного узла и фотокатодного узла макета ЭОП была выбрана технология холодной герметизации через индиевый припой, позволяющей избежать деградации цезий-кислородного покрытия.

В процессе отработки технологии изготовлен ряд макетных образцов ЭОП, а также проведены исследования времени жизни фотокатода после активирования и дальнейших манипуляций.

На одном из лучших макетов получены следующие параметры:

- спектральная чувствительность на длинах волн 660 и 800 нм фотокатода составила  $10^4$  мА/Вт;
- световая чувствительность макета (при пересчете по спектральной чувствительности) – около 1000 мкА/лм.

Также исследованы спектральные характеристики, которые показывают охват данными ЭОП спектрального диапазона от 350 до 900 нм.

По итогам данного этапа работы показана возможность создания хронографического ЭОП с AZB5-фотокатодом для видимой и ближней ИК-области спектра с заданными характеристиками.

#### *Список литературы*

- [1] Pastuszka S., Noppe M., Kratzmann D. et al. // «J.Apple.Phys», 2000, 88, №11.

А.С. СЕРЕБРЯКОВА<sup>1,2</sup>, С.П. МАСЛЕННИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО Научно-производственное предприятие «ТОРИЙ», Москва, Россия,  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## **ИМПУЛЬСНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ СТЕНДА ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ БЕЗНАКАЛЬНЫХ МАГНЕТРОНОВ**

Разработан высоковольтный генератор импульсов на основе полупроводникового блока коммутации для испытаний СВЧ приборов М-типа. Импульсы в нагрузку передаются через повышающий трансформатор и имеют выходные параметры: ~10 кВ, 0.5 мкс.

A.S. SEREBRYAKOVA<sup>1,2</sup>, S.P. MASLENNIKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research and Production Enterprise "TORIY", Moscow, Russia  
<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russia

## **SOLID-STATE PULSE GENERATOR FOR DYNAMIC TEST STAND OF MAGNETRONS WITH COLD CATHODES**

A high-voltage pulse generator is developed on the basis of a semiconductor switching unit for testing microwave M-type devices. The impulses to the load are transmitted through a step-up transformer and he has output parameters: ~10 kV, 0.5us.

В настоящее время генераторы высоковольтных импульсов используются для управления устройствами в различных областях науки и техники.

До сих пор широкое применение находят приборы на основе электроразрядных коммутаторов. Однако, для улучшения динамических и других характеристик в качестве переключающих устройств могут быть использованы составные полупроводниковые коммутаторы, построенные из большого числа модулей на основе современных IGBT и МОП транзисторов, а возможность масштабирования ключа путем увеличения числа входящих в него модулей, позволяет увеличивать диапазон выходных напряжений и токов [1].

В данной работе предлагается высоковольтный полупроводниковый коммутатор (ВПК), построенный из двух идентичных между собой цепочек из пяти последовательно включенных модулей на основе IGBT транзисторов типа IRGP4063 (600В, 144А) и трансформаторной развязкой от цепей управления. Данная развязка позволяет синхронно передавать

импульсы управления на все модули и гальванически развязать их от низковольтной части генератора [2]. Для защиты модулей от возможных перенапряжений в моменты коммутаций и неравномерного распределения напряжений между ними параллельно силовому ключу в каждом модуле устанавливаются цепочки с защитными диодами, а также снабберные RC-цепи.

Созданный коммутатор обладает наносекундными временами переключения и рассчитан на рабочие напряжения до 2,5 кВ и коммутируемые токи до 200 А. Исследования процессов работы предлагаемого генератора осуществлялись при его работе в составе стенда динамических испытаний безнакальных магнетронов на АО «НПП «Торий».

В качестве накопителя энергии в генераторе использовалась емкость, зарядное напряжение  $U_0$  которой в процессе эксперимента составляло 2 кВ. Для получения импульса напряжения  $U_M=10$  кВ (рис.1) на катоде магнетрона (1) в предлагаемом генераторе была использована трансформаторная схема передачи импульсов в нагрузку. Максимальный импульсный ток (2) через магнетрон не превышал 10 А. Длительность импульса на нагрузке при данном режиме  $t_{\text{имп}} = 0.5$  мкс. При таком режиме работы генератора запуск магнетрона происходил при напряжении  $U_M=8$  кВ.

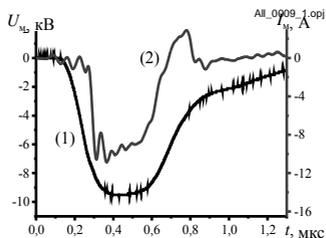


Рис. 1. Импульсы напряжения и токов через магнетрон при  $U_0 = 2$  кВ

Таким образом, полученные результаты говорят о возможности использования данного типа полупроводниковых приборов для получения импульсов высокого напряжения в составе стендов динамических испытаний СВЧ приборов М-типа.

*Список литературы:*

- [1] Серебрякова А.С., Масленников С.П.//Мат. межд. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016». Саратов: СГТУ, 2016. Т.2, С. 351.

С.В. СЫРОМУКОВ, Р.В. ДОБРОВ, В.В. СТЕПНОВ, В.И.  
СЫСОЕВ, А.Н. СТАРОСТИН

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.  
Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

## **ГЕНЕРАТОР НЕЙТРОНОВ НГ-24 ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Дано описание и характеристики генератора нейтронов с запаянной трубкой НГ-24 с потоком  $1 \cdot 10^{11}$  нейтр/с. Представлены основные параметры, конструктивные особенности и принцип действия генератора.

S.V. SYROMUKOV, R.V. DOBROV, V.V. STEPNOV, V.I. SISOEV,  
A.N. STAROSTIN

*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov (FSUE VNIIA),  
Moscow, Russia*

## **NG-24 NEUTRON GENERATOR FOR NUCLEAR TECHNOLOGIES**

A description and characteristics of a neutron generator NG-24 with a sealed tube with a flux of  $1 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$  is given. The main parameters, design features and principle of operation of the generator are presented.

В настоящее время НГ-24 является наиболее мощным отечественным генератором с запаянной трубкой. По основным параметрам он находится на уровне лучших мировых образцов, но имеет минимальные в своем классе габариты. НГ-24 отличает также простота в управлении, стабильная величина потока, возможность быстрой подготовки к работе после включения в сеть. Как и все генераторы с запаянными трубками он практически безопасен в выключенном состоянии. Все эти факторы делают НГ-24 перспективным и доступным электрофизическим источником быстрых нейтронов высокой интенсивности для решения различных практических и научных задач. Фотография генератора НГ-24 представлена на рис.1. Параметры генератора НГ-24 представлены в таблице.

Один из НГ-24, поставленный в ИТЭР, успешно работает с 2014 г. в стенде нейтронной диагностики на территории ТРИНИТИ [1]. НГ-24 используется в МРНЦ им. А.Ф. Цыба для проведения медикобиологических исследований и лечения животных. Результаты

этих работ позволили приступить к созданию установки нейтронной терапии с генератором нейтронов НГ-24 [2]. Медицинские эксперименты на этой установке, которая будет размещена в МРНЦ им. А.Ф. Цыба, планируется начать в 2021 г.



Рис. 1. Генератор нейтронов НГ-24. 1 – устройство излучения, 2 – блок питания, 3 – мишень

Таблица 1. Параметры генератора нейтронов НГ-24

Поток ( <i>D-T</i> трубка)	$1 \cdot 10^{11}$ нейтр/с
Поток ( <i>D-D</i> трубка)	$1 \cdot 10^9$ нейтр/с
Ресурс нейтронной трубки	500 ч
Состав НГ-24	Устройство излучения, блок питания, устройство охлаждения
Мишень	заземлена
Режим излучения	постоянный
Режим работы	непрерывный
Габариты устройства излучения	$\varnothing 430 \times 1110$ (175 кг)
Габариты блока питания	$470 \times 450 \times 285$ (25 кг)
Габариты устройства охлаждения	$575 \times 593 \times 786$ мм (77 кг)
Питание	50/60 Гц, 220, В 2,5 кВт

*Список литературы*

- [1] Sevast'yanov V. D. et al. // Measurement Techniques, Vol. 59, No. 9, 2016, p. 994 – 1001.  
 [2] Ульяновко С.Е. и др. // Сборник докл. Межд. научно-техн. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». – М.: ВНИИА, 2012, с. 175-178.

Е.М. ТЮРИН, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, И.В. УРУПА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **СПЕКТРОМЕТРИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЕТЕКТОРАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований применения алмазных детекторов для проведения спектрометрии быстрых нейтронов (14 МэВ), возникающих при протекании реакции d-t в газонаполненной нейтронной трубке. Результаты представлены для алмазного детектора, значение разрешения которого не превышает 1% по энергии альфа частиц 7,6 МэВ. Для оценки разрешения детектора использовался источник альфа-частиц Ra-226.

E.M. TYURIN, R.F. IBRAGIMOV, I.V. URUPA

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

## **SPECTROMETRY OF THE FAST NEUTRONS BY USING RADIATION DIAMOND DETECTOR**

The results of experimental studies of the using diamond radiation detector for spectrometry fast neutrons with energy value around 14 MeV arising from the d-t reaction in a gas-filled neutron tube have presented in this work. Listed experimental results was achieved by using the radiation diamond detector and spectrometry electronic devices that provide value of Full Width at Half Maximum (FWHM) less than 1% at energy of alpha particle 7,6 MeV. For FWHM estimation were used isotope Ra-226 – source of alpha particles with few different energies.

В сравнении с другими диэлектриками и полупроводниками наиболее важными свойствами синтетического алмаза для исследования нейтронов высоких энергий является большое значение ширины запрещенной зоны (5,5 эВ), высокая электронно-дырочная подвижность ( $2200 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  для электронов и  $1600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  для дырок) и короткое время жизни носителей зарядов. Также отмечается высокая радиационная стойкость и малые габариты, что позволяет размещать данные детекторы в непосредственной близости от мишени генератора нейтронов [1].

В результате работы получен суммарный спектр отклика алмазного детектора на 14 МэВ нейтроны (рис.1).

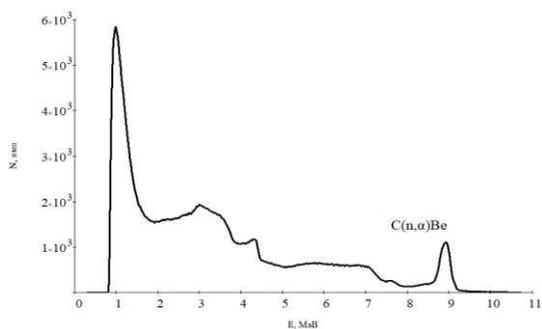


Рис. 1. Спектр отклика алмазного детектора на 14 МэВ нейтроны

С помощью метода наименьших квадратов проведено восстановление энергетического спектра d-t нейтронов, зарегистрированных детектором на основе алмаза, а при сравнении полученных экспериментальных данных и результатов моделирования проведено вычисление соотношения вкладов в итоговый спектр от нейтронов, образовавшихся в различных условиях (из атомарных (D<sup>+</sup>) или молекулярных (D<sub>2</sub><sup>+</sup>) ионов дейтерия, атомарных (T<sup>+</sup>) или молекулярных (T<sub>2</sub><sup>+</sup>) ионов трития, или молекулярных ионов DT<sup>+</sup> падающих на мишень, содержащую атомы D и T). Проведено сравнение с результатами аналогичных экспериментов [2,3].

Кроме того, в ходе экспериментов попутно изучалось влияние эффекта поляризации на работу алмазного детектора. Установлено, что поляризация не оказывает негативного влияния на показания детектора при исследуемых потоках быстрых нейтронов с энергией около 14 МэВ при непрерывной работе детектора под облучением в течение нескольких часов. Также исследован вклад рентгеновского и гамма-излучения на работу алмазного детектора и используемой электроники (зарядочувствительного усилителя).

*Список литературы*

- [1] Берлев А.И. и др. // Письма в ЭЧАЯ, 2016 №3(201) – С.558-566.
- [2] Pillon M. et al. // Nuclear Instr. and Methods in Physics Research A 640(2011) С.185–191.
- [3] Giacomelli L. // Rev. Sci. Instrum. 87 11D822 (2016)

С.Б. ЧЕБЫШОВ<sup>1</sup>, Р.А. НАСИБУЛЛИН<sup>1</sup>, А.С. ГОРДЕЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения  
(АО «СНИИП»), Москва, Россия*

<sup>2</sup>*АО «РАСУ», Москва, Россия*

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЦОТ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ СТАНДАРТА LORAWAN**

Произведена оценка применимости стандарта LoRaWAN как программно-технических средств связи при построении системы экологического мониторинга окружающей обстановки.

S.B. CHEBISHOV<sup>1</sup>, R.A. NASIBULLIN<sup>1</sup>, A.S. GODEEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Specialized Scientific Research Institute for Instrumentation Engineering (JSC  
“SNIIP”), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*JSC «RASU», Moscow, Russia*

## **THE ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF WIRELESS TECHNOLOGIES FOR THE ЦОТ AT CONSTRUCTING AN INDUSTRIAL OBJECT PARAMETERS OF MONITORING SYSTEM ON THE BASIS OF LORAWAN STANDARTS**

The applicability of the LoRaWAN standard as a software and hardware means of communication in the construction of the environmental monitoring system is evaluated.

Сеть LoRaWAN предназначена для интеграции датчиков и приложений, которые должны отправлять небольшие объемы данных на большие расстояния несколько раз в час. Рассмотрим характеристики данной сети в рамках решения задач автоматизированной системы экологического мониторинга (АСЭМОО): контроль различных параметров на удаленных друг от друга объектах, наличие большого количества точек контроля, безопасность передачи данных, и др.

Преимуществами использования стандарта LoRaWAN являются:

- обеспечение устойчивой связи на расстоянии до 3,5 км в городских условиях и до 15 км в условиях прямой видимости;
- открытый частотный диапазон, не требующий лицензирования;

- двусторонний зашифрованный канал связи, ключи шифрования (AES128 для устройства, EUI64 для сети и EUI64 для приложения);
- большая емкость сети (поддержка свыше 1 000 000 устройств в одной сети, возможность обслуживания одной базовой станцией (далее БС) до 10 000 устройств в зоне покрытия);
- увеличение срока службы батареи за счет топологии «звезда в звезде») и низкая потребляемая мощность;
- отсутствие привязки конечных устройств к одному шлюзу (БС);
- легкая масштабируемость сети из-за отсутствия повторителей;
- эффективная реализация режима энергосбережения (быстрый переход из режима сна и обратно на оборудовании LoRa, потребление в режиме приема данных – 9,7 мА, в режиме передачи до 20 мА, в режиме сна – 0,2 мА)



Рис. 1 Топология построения АСЭМОО на основе LoRaWAN

В связи с тем, что АСЭМОО является масштабируемой и многоуровневой программно-аппаратной платформой, включающей совокупность контролируемых параметров разного направления [1] и содержит интеллектуальную систему принятия решений, которая при возникновении внештатной ситуации методом расчета и прогнозирования предоставляет пользователю четкий набор инструкций, представленная технология LoRaWAN, в рамках систем аналогичных по назначению с АСЭМОО, может быть интегрирована как на уровне постов экологического контроля, так и на уровне центрального сервера системы в качестве Приложения для сбора и обработки данных для последующего представления конечному пользователю (оператору системы).

#### Список литературы

- [1] Насибуллин Р.А. // Науч.-практ. конф. «25 лет СНГ. Новые возможности интеграции и партнерства», 2016 г., Москва, НИЯУ МИФИ.

**С.Б. ЧЕБЫШОВ, И.И. ЧЕРКАШИН, В.И. КАЛИН, А.В. КАЛИН**

*Акционерное общество «Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «СНИИП»), Москва, Россия.*

## **БЛОК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ИНЕРТНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ**

В докладе рассмотрен широкодиапазонный сцинтилляционный блок детектирования для измерения объемной активности инертных радиоактивных газов, работающий в двух режимах – частотном и аналоговом. Приведены графики зависимости частоты и напряжения от объемной активности.

**S.B. CHEBYSHOV, I.I. CHERKASHIN, V.I. KALIN, A.V. KALIN**

*Specialized Scientific Research Institute for Instrumentation Engineering (JSC “SNIP”), Moscow, Russia*

## **A DETECTION UNIT FOR MEASURING VOLUME ACTIVITY OF INERT RADIOACTIVE GASES**

The report describes a wide-range scintillation detection unit for measuring the volume activity of inert radioactive gases operating in two modes—frequency and analog. Graphs of frequency and voltage dependence on volume activity are presented.

Работа блока детектирования (БД) основана на использовании ФЭУ в двух режимах работы: импульсном и токовом, что позволяет расширить верхний диапазон измерений до  $10^{11}$  Бк/м<sup>3</sup> [1]. БД имеет два выходных сигнала – частотный и аналоговый. В процессе измерения ОА газа устройство обработки выходных данных с БД анализирует значение на аналоговом выходе. До тех пор, пока значение не превысило установленный порог, результат измерения определяется по частотному выходу БД. При превышении порога, результат измерения определяется по аналоговому выходу БД. Значение установленного порога определяется таким образом, чтобы разбить диапазон измерения на два поддиапазона: от  $10^4$  до  $10^9$  Бк/м<sup>3</sup>, в котором измерения осуществляются по данным частотного выхода БД и от  $10^8$  до  $10^{11}$  Бк/м<sup>3</sup>, в котором измерения осуществляются по данным аналогового выхода [2]. Внешний вид блока детектирования приведен на рис. 1.

Конструкция БД предусматривает измерительную камеру, в которой расположен сцинтилляционный детектор, контактирующий с измеряемой газовой средой, электронные узлы обработки сигналов с ФЭУ,

обеспечивающие формирование сигналов на частотном и аналоговом выходах БД и защиты от внешнего фотонного излучения.

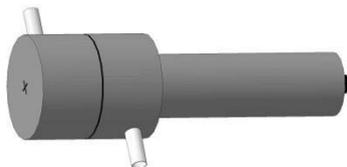


Рис.1. Внешний вид блока детектирования

На изготовленном и настроенном макетном образце были проведены измерения зависимости скорости счета от объемной активности нуклида Криптон-85. График зависимости представлен на Рис.2.

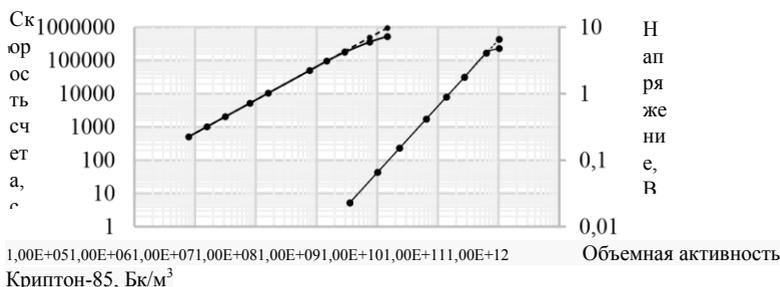


Рис.2. Зависимость скорости счета и напряжения от объемной активности Криптона-85.

Анализ полученных результатов показал, что характеристика зависимости скорости счета от объемной активности отклоняется на 25%, а характеристика зависимости напряжения от объемной активности отклоняется на 27%. Такая степень нелинейности может быть скорректирована программно с помощью поправочных коэффициентов, записанных в устройстве обработки данных от БД, что приводит к корректности измерений объемной активности в диапазоне от  $10^4$  до  $10^{11}$  Бк/м<sup>3</sup>.

*Список литературы*

[1] Фертман Д. Е., Чебышов С. Б. Радиометрия сред // М.: АО ФИД «Деловой экспресс», 2017  
 [2] Средства измерений объемной активности радионуклидов в газе. Общие технические требования и методы испытаний ГОСТ 21496П89.

**В.Ю. ШАЛАМОВА, А.А. ИВАНОВ**

*Акционерное общество «Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «СНИИП»), Москва, Россия.*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПАРОВ I-131 В ПРИСУТСТВИИ ИНЕРТНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ**

Контроль активности I-131 в воздухе на объектах использования атомной энергии является одним из важных вопросов обеспечения радиационной безопасности персонала и населения. Тенденция к снижению предельно допустимых уровней поступления радиоактивных веществ в окружающую среду обуславливает необходимость совершенствования методов контроля радионуклидов, в том числе I-131. В АО «СНИИП» разработано новое устройство детектирования объемной активности паров I-131 УДАГ-08Р. Устройство предназначено для измерения объемной активности паров I-131, в том числе в присутствии инертных радиоактивных газов, в воздухе рабочих помещений, системах вентиляции и выбросных коммуникациях; показано, что устройство обеспечивает такие измерения с нормированной погрешностью измерений.

**V.YU. SHALAMOVA, A.A. IVANOV**

*Specialized Scientific Research Institute for Instrumentation Engineering (JSC "SNIIP"), Moscow, Russia*

## **MEASUREMENTS OF VOLUMIC ACTIVITY OF I-131 IN THE PRESENCE OF NOBLE RADIOACTIVE GASES AT NUCLEAR FACILITIES**

Monitoring of activity of I-131 at nuclear facilities is an important question of safety precautions of staff and citizens. Trend of decrease of maximum permissible discharges of radionuclides to the environment leads to necessity of monitoring method improvement including monitoring methods of I-131. SNIIP designed a new measuring mean of I-131 volumic activity, the device named UDAG-08R. It measures the I-131 volumic activity in air of work space, ventilation systems or effluent communications, in particular, in presence of noble radioactive gases. It is shown that these measurements are fulfilled within the standardized measurement error.

Новое устройство УДАГ-08Р заменит использующийся сейчас блок детектирования БДАГ-05Р1. Оба устройства предназначены для непрерывного контроля концентрации паров I-131 в автономном режиме и в составе автоматических систем радиационного контроля в воздухе рабочих помещений и системах вентиляции. Применение нового

алгоритма расчета объемной активности позволило существенно упростить новое устройство (см. рис. 1), а также улучшить его метрологические характеристики.

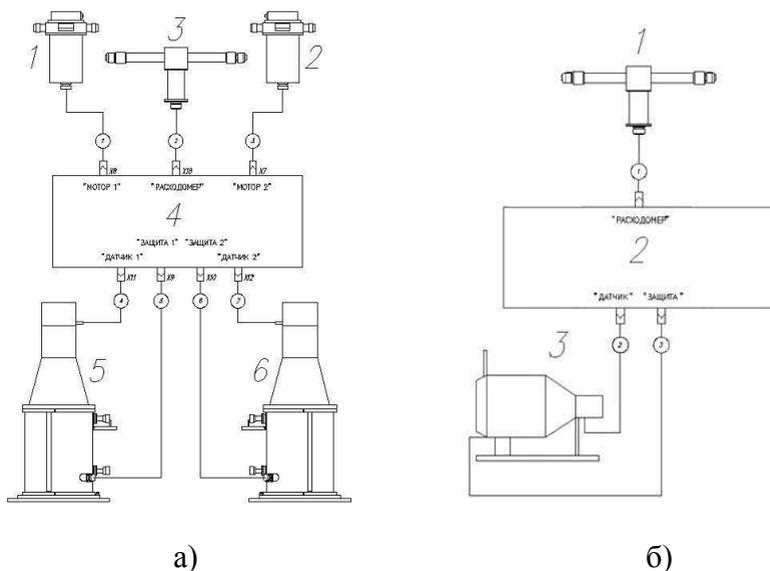


Рис. 1. Функциональные схемы БДАГ-05Р1 (а) и УДАГ-08Р (б)

Одним из важных аспектов контроля I-131 является влияние присутствия инертных радиоактивных газов [1]. Были проведены испытания устройства УДАГ-08Р для проверки влияния присутствия инертных радиоактивных газов на погрешность измерений объемной активности I-131. Согласно результатам испытаний устройство отвечает требованиям, предъявляемым к средствам измерений объемной активности паров I-131.

*Список литературы*

[1] IEC 60761-4:2002 Equipment for continuous monitoring of radioactivity in gaseous effluents Part 4: Specific requirements for radioactive iodine monitors.

**Секция**

**ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА  
И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции – Петровский В.Н., доцент  
кафедры № 37

Секретарь секции – Губский К.Л., доцент  
кафедры № 37

Тел. (495)788-56-99, доб.8376, Факс (495)324-97-55  
E-mail: [KLGubskij@mephi.ru](mailto:KLGubskij@mephi.ru)

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,  
А.Ю. КОЗЛОВ, А.М. САГИТОВА, Д.В. СИНИЦЫН  
*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЩЕЛЕВОЙ CO<sub>2</sub>- ЛАЗЕР С ВЧ-НАКАЧКОЙ И АКТИВНОЙ СИНХРОНИ- ЗАЦИЕЙ МОД**

Впервые исследуется генерация наносекундных импульсов, получаемых в щелевом CO<sub>2</sub>-лазере с ВЧ-накачкой с помощью активной синхронизации мод акустооптическим модулятором.

A.A. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY, YU.M. KLIMACHEV,  
A.YU. KOZLOV, A.M. SAGITOVA, D.V. SINITSYN  
*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **REPETITIVELY-PULSED ACTIVELY MODE-LOCKED SLAB RADIO-FREQUENCY DISCHARGE CO<sub>2</sub> LASER**

Nanosecond pulses generation are for the first time obtained in a slab radio-frequency discharge CO<sub>2</sub> laser actively mode-locked by an acousto-optic modulator.

Использование субмикросекундных и наносекундных импульсов хорошо отработанных в техническом плане газоразрядных лазеров актуально не только для решения различных технологических задач [1], но и для эффективного преобразования излучения в среднем ИК диапазоне вплоть до 20 мкм [2,3]. В частности, использование цуга наносекундных импульсов, получаемого в режиме синхронизации мод (СМ), вместо режима свободной генерации излучения электроионизационного СО-лазера дает пятикратное увеличение коэффициента преобразования в нелинейных кристаллах [2]. Необходимо отметить, что повышение пиковой мощности в щелевых газовых лазерах, например, за счет использования модуляции добротности резонатора [3], сталкивается с определенными трудностями из-за малого межэлектродного зазора. Особенно усложняется задача получения наносекундных импульсов генерации щелевого CO<sub>2</sub> лазера в режиме СМ из-за необходимости работы при повышенных давлениях, определяющих спектральную ширину контура усиления, и, в конечном итоге, предельную длительность наносекундного импульса.

Поэтому целью нашей работы было исследование возможности получения режима активной СМ в щелевом CO<sub>2</sub>-лазере с ВЧ накачкой.

В качестве активной среды использовалась рабочая газовая смесь  $\text{CO}_2 : \text{Xe} : \text{He} = 3 : 1 : 16$  при давлении 75 Торр, которая возбуждалась ВЧ-разрядом с частотой 150 Гц. Активная СМ обеспечивалась акустооптическим модулятором (АОМ), помещенным внутрь лазерного резонатора рядом с глухим плоским зеркалом. При активной длине лазера 25 см длина резонатора  $\text{CO}_2$ -лазера составляла 5,55 м, а в качестве выходного зеркала использовалось плоское диэлектрическое зеркало с коэффициентом пропускания 30%. Длина резонатора подбиралась таким образом, чтобы частота воздействия модулятора на лазерную генерацию совпадала с частотой межмодовых биений.

Временная форма импульса излучения  $\text{CO}_2$ -лазера в режиме СМ при минимальной мощности ВЧ-генератора, возбуждающим акустическую волну в АОМ, представлена на рис. 1. На врезке рисунка мы видим, что полный импульс излучения состоял из цуга пиков длительностью  $\sim 6$  нс по полувысоте, следующих с частотой  $\sim 28$  МГц. Максимальная пиковая мощность излучения составила  $\sim 17$  Вт.

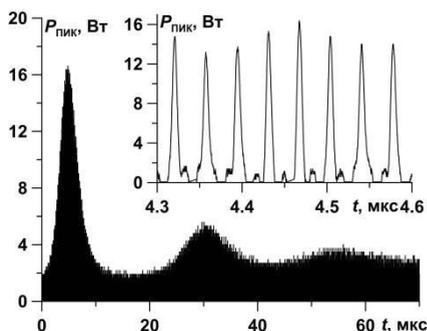


Рис. 1. Форма импульса излучения при минимальной мощности АОМ

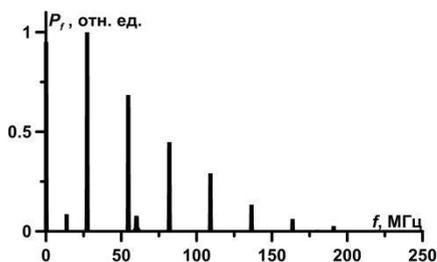


Рис. 2. Фурье-спектр излучения при минимальной мощности АОМ

Фурье-спектр мощности генерации  $\text{CO}_2$ -лазера в режиме СМ представлен на рис. 2. В данных экспериментальных условиях было зафиксировано 5 засинхронизованных мод ( $\sim 120$  МГц FWHM).

Исследование было поддержано Российским научным фондом (проект № 16-19-10619).

#### Список литературы

- [1] S. Gräf et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2015. Vol. 66, pp. 152–157.
- [2] Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A. et al. // Opt. Comm. 2009. Vol. 282, pp. 294–299.
- [3] А.А. Ионин, И.О. Киняевский, Ю.М. Климачев и др., Сборник трудов конференции «Прикладная оптика – 2018». 2018. Том. 2, сс. 11-16.

К.А. ПОЛЕВОВ<sup>1</sup>, Ю.Л. КОПЫЛОВ<sup>1,2</sup>, А.Л. КОРОМЫСЛОВ<sup>1</sup>,  
К.В. ЛОПУХИН<sup>1,2</sup>, И.М. ТУПИЦЫН<sup>1</sup>, Е.А. ЧЕШЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

## ОТЕЧЕСТВЕННАЯ КОМПОЗИТНАЯ КЕРАМИКА $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

В лазерах на основе отечественной композитной керамики  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  с продольной диодной накачкой исследованы характеристики в режиме модуляции добротности резонатора пассивным  $\text{Cr}:\text{YAG}$  затвором. Измеренная эффективность близка к эффективности лазера с кристаллическим пассивным затвором.

К.А. POLEVOV<sup>1</sup>, Yu.L. KOPYLOV<sup>1,2</sup>, A.L. KOROMYSLOV<sup>1</sup>,  
K.V. LOPUKHIN<sup>1,2</sup>, I.M. TUPITSYN<sup>1</sup>, E.A. CHESHEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup> Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy  
of Sciences, Fryazino, Russia

## RUSSIAN COMPOSITE CERAMICS $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

In lasers with composite ceramic  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG} / \text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  elements with longitudinal diode pumping, lasing was obtained at a wavelength of 1064 nm in the mode of Q-switch modulation by the  $\text{Cr}:\text{YAG}$  saturable absorber. The measured efficiency is close to the efficiency of a laser with a crystalline saturable absorber.

Отечественная технология синтеза лазерной керамики позволяет получать образцы лазерной керамики, не уступающие качеству керамики фирмы Konoshima Chem. Corp., Ltd. [1]. По сравнению с монокристаллическим материалом керамика обладает многими преимуществами: возможность использования элементов больших размеров, любой формы, с заданным профилем легирования, возможность сильного как однородного, так и градиентного легирования по объему и составу, позволяющего создавать комбинированные лазерные элементы, например активный элемент с пассивным затвором [2][3][4][5], значительно более высокая прочность к разрушению, сравнительно низкая стоимость производства и пр. Особый интерес представляет создание в едином технологическом про-

цессе монолитной композитной керамики, включающей активную среду Nd:YAG и пассивный затвор Cr:YAG.

Представленная работа посвящена исследованию характеристик лазера на основе такой композитной керамики.

В схеме с продольной диодной накачкой (рис. 1) с резонатором длиной  $L=20$  мм для лазеров на основе композитных керамик  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  производства ФИРЭ РАН выполнены измерения начального пропускания  $T_0$ , порогов генерации  $P_{\text{thresh}}$ , длительности  $\tau$  и энергии импульса  $E_{\text{pulse}}$  излучения, среднего количества импульсов генерации  $N$ , приходящихся на один импульс накачки, средней мощности генерации  $\langle P_{\text{gen}} \rangle$  и эффективности  $\eta$ , равной отношению мощности генерируемого излучения к поглощенной мощности накачки. Результаты измерений приведены в табл. 1.

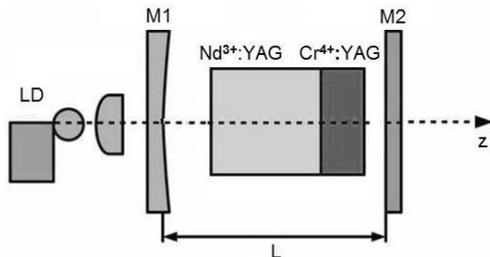


Рис. 1. Схема лазера с композитным  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  элементом. LD-лазерный диод. M1- сферическое зеркало резонатора, которое просветлено на длину волны накачки 808 нм и глухое на длине волны генерации, M2 -выходное зеркало плоское, установлено на трансляционную платформу.

№ образца	$T_0, \%$	$\tau, \text{нс}$	$N$	$\nu, \text{кГц}$	$\langle P_{\text{gen}} \rangle, \text{мВт}$	$E_{\text{pulse}}, \text{мкДж}$	$P_{\text{thresh}}, \text{Вт}$	$\eta, \%$
крист.ПЗ	87	12	10,5	21	448	21	0,046	21 %
комп.№2	78-81	35	28	56	253	4,6	1,1	19%
комп.№1	75	50	29,5	59	173	3	0,9	11 %
цил.комп (1%)	68	14	16	32	709	22	0,6	33%
цил.комп (2%)	68	10	9	18	456	25	1,2	30%

Табл. 1. Генерационные характеристики лазеров на основе композитной  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG} / \text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  керамики производства ФИРЭ РАН.

Проведенные исследования позволяют заключить, что технология позволяет изготавливать образцы композитных элементов лазерного качества и требует дальнейшего совершенствования

*Список литературы*

- [1] V.V. Bezotosnyi, V.V. Balashov, V.D. Bulaev, A.A. Kaminskii, A.Yu. Kanaev, V.B. Kravchenko, A.V. Kiselev, Yu.L. Kopylov, A.L. Koromyslov, O.N. Krokhin, K.V. Lopukhin, S.L. Lysenko, M.A. Pankov, K.A. Polevov, Yu.M. Popov, E.A. Cheshev, I.M. Tupitsyn, Lasing characteristic of new Russian laser ceramics, *Quantum Electronics*, 48, 9, (2018) 802-806.
- [2] A. Ikesue, Y.L. Aung, Ceramic laser materials, *Nat. Photo.* 2 (2008) 721–727.
- [3] A. Ikesue, Y.L. Aung, *J. Am. Ceram. Soc.* 89 (2006) 1936.
- [4] G. Messing, JTO program report, (2006).
- [5] W.P. Latham, A. Lobad, T.C. Newell, D. Stalnaker, *Proceedings of the Int.*

А.А. ВОЗНЕСЕНСКАЯ, Д.А. КОЧУЕВ, А.В.КИРЕЕВ,  
А.В. ЖДАНОВ, А.С. РАЗНОСЧИКОВ

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и  
Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия*

## **СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ ПОРОШКОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ**

В данной работе проводилось исследование возможности изготовления деталей методом селективного лазерного плавления жаропрочной стали отечественного производства. Проведено исследование структурно-фазового состава порошкового материала методом рентгеновской спектроскопии, исследован гранулометрический состав методом растровой электронной микроскопии. Плавление порошкового материала происходило на промышленной установке для селективного лазерного сплавления, проведена оптимизация параметров лазерного плавления опытных образцов. Информация о характере текущих процессов плавления получена в результате анализа геометрических характеристик зон лазерного воздействия. Структура сформированного материала, поры и микротрещины выявлены с помощью металлографического анализа.

A.A. VOZNESENSKY, D.A. KOCHUYEV, A.V. KIREEV, A.V.  
ZHDNOV, A.S. RAZNOSCHIKOV

*Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai  
Grigorievich Stoletov (VISU), Vladimir, Russia*

## **SELECTIVE LASER MOLDING OF POWDERS OF HEAT- RESISTANT STEELS**

In this work, a study was conducted of the possibility of manufacturing parts by the method of selective laser melting of heat-resistant steel of domestic production. The study of the structural-phase composition of the powder material by X-ray spectroscopy was carried out, and the particle size distribution was studied by scanning electron microscopy. Powder material was melted at an industrial facility for selective laser fusion, and the parameters of laser melting were optimized for experimental samples. Information on the nature of the current melting processes was obtained as a result of analyzing the geometric characteristics of laser irradiation zones. The structure of the formed material, pores and microcracks were revealed using metallographic analysis.

Перспективным подходом изготовления литевых форм из стали является селективное лазерное плавление [1]. Пресс-форма может быть выражена вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки [2].

В данной работе в качестве материала использовалась жаропрочная сталь российского производства. Структурно-фазовый состав порошкового материала изучали методом рентгеновской спектроскопии на приборе D8 ADVINCE (BRUKER, Германия), распределение частиц по размерам порошкового материала методом сканирующей электронной микроскопии на 3D-приборе Quanta 200.

Полученный порошковый материал был расплавлен на установке лазерной селективного лазерного плавления (Concept Laser M2 Cusing, Германия), оборудованный иттербиевым волоконным лазером мощностью 400 Вт, работающим непрерывной генерации в режиме. Порошковая композиция наносилась на поверхность стальной подложки, толщина порошкового слоя составляла 30 мкм. Полученную поверхность облучали лазером, длина волны излучения составляла 1,06 мкм. Рабочее пространство находилось в среде азота.

Формирование однородного расплавленного слоя возможно только при образовании достаточного количества жидкой фазы металла, поэтому проводится оптимизация параметров лазерного плавления. Критерием, определяющим удовлетворительное качество обработки при выборе режима воздействия, являлось состояние формируемой поверхности. Информация о характере текущих процессов плавления получена в результате анализа геометрических характеристик зон лазерного воздействия. На оптическом микроскопе были получены изображения поверхности образцов с последующей обработкой изображений в программе Altami Studio.

Структура образовавшегося материала, поры и микротрещины обнаружены металлографическим анализом. Для получения микрофотографий полученных срезов использовалась металлографический микроскоп ММН-2. На основании полученных данных были сделаны выводы об изменениях химического, фазового состава, характера распределения и изменениях фазовых состояний.

#### *Список литературы*

1. Чемодуров А. Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – №. 8-2.
2. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении //Зленко МА, Попович АА, Мутылина ИН–Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета. – 2013.

А.А. УШАКОВ<sup>1,2,3</sup>, П.А.ЧИЖОВ<sup>1</sup>, Н.А. ПАНОВ<sup>2,3</sup>,  
Д.Е. ШИПИЛО<sup>2,3</sup>, В.В. БУКИН<sup>1</sup>, О.Г. КОСАРЕВА<sup>2,3</sup>,  
С.В. ГАРНОВ<sup>1</sup>, А.Б. САВЕЛЬЕВ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва*

<sup>3</sup>*Международный лазерный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

## **ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ОБРАТНОМ НАПРАВЛЕНИИ ИЗ ДВУХЧАСТОТНОЙ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ**

Мы впервые проводим измерение основных характеристик терагерцевого (ТГц) излучения из двухчастотной плазмы в направлении обратном направлению распространения двухчастотной лазерной накачки: временную форму, спектр и энергию. Спектр ТГц излучения в обратном направлении имеет низкочастотное смещение по сравнению со спектром ТГц излучения в прямом направлении. Измерение энергии импульсов ТГц излучения в прямом и обратном направлениях при различных энергиях демонстрирует величину их соотношения ~5.5% которая разумно согласуется с результатами численного моделирования.

A.A. USHAKOV<sup>1,2,3</sup>, P.A. CHIZHOV<sup>1</sup>, N.A. PANOV<sup>2,3</sup>,  
D.E. SHIPILO<sup>2,3</sup>, V.V. BUKIN<sup>1</sup>, O.G. KOSAREVA<sup>2,3</sup>,  
S.V. GARNOV<sup>1</sup>, A.B. SAVEL'EV<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia,*

<sup>2</sup>*Physics Faculty, M.V. Lomonosov State University, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

## **STUDY OF BACKWARD TERAHERTZ EMISSION PROPERTIES FROM TWO-COLOR LASER-INDUCED PLASMA**

For the first time we measured key characteristics of the backward terahertz (THz) emission from two-color femtosecond laser spark in air: waveform, spectrum and energy. The spectrum of the backward THz radiation is shifted to the low-frequency range as compared with the forward one. Measurements of the energy of the backward and forward THz pulses for different pump pulse energies provide their ratio ~5.5% which quantitatively agrees with the results of our numerical simulations.

Одним из наиболее перспективных источников ТГц излучения является двухчастотная лазерно-индуцированная плазма. Ключевым вопросом для таких источников является излучение диаграммы направленности выходящего ТГц излучения, в особенности распространяющегося под углом близким к  $90^\circ$  и более относительно оптической оси. В данной работе проводится исследование ТГц излучения, распространяющегося из двухчастотной лазерно-индуцированной плазмы в направлении, обратном распространению двухчастотного излучения накачки.

Для генерации оптического излучения использовалась лазерная система с частотой следования импульсов 1 кГц, центральной длиной волны 800 нм, энергия импульса 2.7 мДж, длительность импульса 40 фс, диаметр пучка 12 мм по уровню  $e^{-2}$ . Для наибольшей эффективности генерации ТГц излучения в лазерной плазме использовались импульсы на основной и удвоенной частотах с линейными и коллинеарными состояниями поляризации, совмещенными по времени, с последующей фокусировкой параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 0.8 дюйма.

Для регистрации ТГц излучения в прямом направлении использовался либо электрооптический (ЭО) детектор либо детектор Голея. Расходящееся излучение из плазмы в этом случае собиралось двумя тефлоновыми линзами в детектор. ТГц излучение, распространяющееся в направлении обратном распространению оптической накачки вначале коллимировалось тем же параболическим зеркалом, которое использовалось для фокусировки оптического излучения, и затем частично отражалось от поставленной под углом  $45^\circ$  к оптической оси металлической пластинки. В пластинке было вырезано отверстие диаметром 15 мм, через которое беспрепятственно проходило оптическое излучение. Далее ТГц излучение также фокусировалось с помощью тефлоновой линзы в ЭО детектор или детектор Голея. Для заведения пробного оптического пучка в данном случае использовалось то же отверстие в металлической пластинке, через которое кроме пробного пучка пропускалось и излучение двухчастотной накачки. Затем оптический пучок проводился через 1 мм отверстие в тефлоновой линзе, применяемой для фокусировки ТГц излучения, в ЭО детектор. Измерения с детектором Голея проводились с помощью техники синхронного детектирования, для чего в систему внедрялся модулятор с частотой модуляции 15 Гц и синхронный детектор.

В ходе экспериментов были измерены временные формы ТГц импульсов в прямом и обратном направлении из двухчастотной лазерной плазмы. Применяя дискретное преобразование Фурье к полученным временным формам, были получены соответствующие спектр. Сравнительный анализ

показал, что спектр ТГц излучения в прямом направлении располагается в более высокочастотной области по сравнению со спектром ТГц в обратном направлении, имеющий максимум на частоте 0.5 ТГц и располагающийся в области частот 0.3-1.5 ТГц.

Измерение энергии ТГц импульсов в обратном и прямом направлениях от энергии импульсов двухчастотной накачки в диапазоне энергий 1.2-2 мДж дало соотношение 5.5%. Для сравнения было проведено моделирование в рамках интерференционной модели. Полученное в итоге численного эксперимента данное соотношение количественно согласуется с результатами экспериментальных измерений.

П.А. ПАЛКИН<sup>1</sup>, А.Б. ЛЮХТЕР<sup>1</sup>, А.В. ЗАВИТКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Владимирский государственный университет ВлГУ имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия*

<sup>2</sup>*Владимирский инженеринговый центр внедрения лазерных технологий в машиностроении при ВлГУ, Владимир, Россия*

## **ОПЫТ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В докладе представлены результаты формирования наплавленных слоев порошка жаропрочной стали, распыляемого из многоканального коаксиального сопла в среде защитных газов. Спекание осуществлялось излучением иттербиевого волоконного лазера. Представлены результаты металлографического исследования и механических испытаний поперечных секций образцов наплавки.

P.A. PALKIN<sup>2</sup>, A.B. LYUKHTER<sup>2</sup>, A.V. ZAVITKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Vladimir state university named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russia*

<sup>2</sup>*Vladimir Engineering Center use of laser technology in mechanical engineering under VLSU, Vladimir, Russia*

## **EXPERIENCE OF DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF LASER CLADDING OF POWDER MATERIALS**

The report presents the results of the formation of deposited powder layers of heat-resistant steel sprayed from a multichannel coaxial nozzle in protective gases. Sintering was carried out by ytterbium fiber laser. The results of metallographic studies and mechanical tests of the transverse sections of the deposited samples are presented.

Технология формирования наплавленных слоев потоками высокой энергии, прежде всего волоконными лазерами, из порошковых материалов, распыляемых формирующими канальными модулями, в среде защитных газов характеризуется высокими скоростями нагрева и охлаждения наплавленных слоев. Одна из важнейших задач технологии лазерной наплавки (ЛИ) заключается в подборе оптимального режима основанного на балансе скорости движения и плотности энергии источника, обеспечивающих: с одной стороны, достаточное спекание наплавленных слоев, с другой стороны минимальное порообразование и выгорание легирующих элементов. [1]. Решением этой проблемы, прежде всего, является подбор оптимальной погонной энергии и фокусного расстояния лазера, однако технологическое решение - использование специального мультисканально-

го сопла, формирующего поток распыляемого порошка в зоне фокусировки [2].

При проведении опытных работ применялся лазерный роботизированный комплекс ЛРК-Н «ИЦ при ВлГУ», дополнительно оснащенный: питателем порошка АТ-1200; специальным модулем 4-х сторонней подачи порошка с коаксиальным соплом и системой охлаждения, разработанной НТО ИРЭ-Полнос.

Порошок из жаропрочной высоколегированной низкоуглеродистой стали наплавляли на два типа подложек: жаропрочную, низкоуглеродистую и конструкционные стали, в среде аргона.

Исследования образцов наплавки проводились на базе лабораторий НОЦ ВЛТ ВлГУ. Результаты исследований будут представлены в докладе. В структуре наплавленных слоев наблюдаются дендриты, сформированные вдоль линии отвода теплоты. Твердость наплавки составила 25-30 HRC. Величина адгезии соизмерима с прочностью слоя наплавки.

Технология лазерной наплавки с 4-х канальным соплом позволила сформировать линейные и спиралеобразные слои, которые формировались при вращении изделия вокруг своей оси (рис. 1).

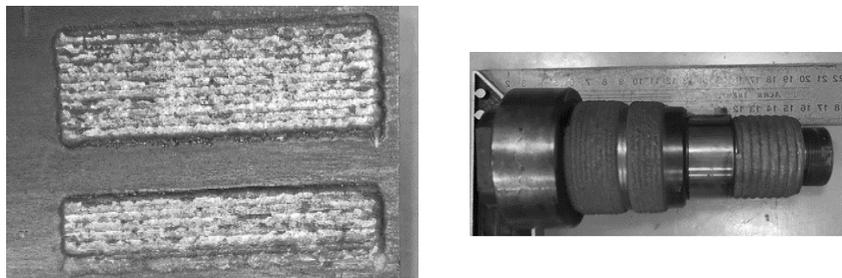


Рис. 1. Линейные (слева) и спиралеобразные слои (справа) дорожки лазерной наплавки

Применение 4-х канального сопла при наплавке с излучением иттербиевого лазера, позволило обеспечить равномерность и высокую адгезию наплавленных слоев.

*Список литературы*

- [1] Бирюков В.П, Фишков А.А, Татаркин Д.Ю, Хриптович Е.В., Быковский Д.П., Петровский В.Н. Влияние режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на абразивную износостойкость покрытий // Photonics № 3 2016. №3, С. 32-43.
- [2] Морунов И. В., Крылова С. Е., Оплеснин С. П. Принцип лазерной наплавки порошковыми материалами в среде защитных газов коррозионно-стойких сталей // Сварка. Реновация. Триботехника: тезисы докладов VII Уральской научно-практической конференции. 2017. С. 27-31.

А.В. ПЕНТО<sup>1</sup>, А.Р. МУХАМАТНУРОВА<sup>2</sup>, И.И. КУЗЬМИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

<sup>3</sup>*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва*

## **ДЕСОРБЦИЯ ИОНОВ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ДЛИН ВОЛН 351 НМ И 263 НМ**

Представлены результаты экспериментов по импульсной лазерной десорбции ионов органически соединений с наноструктурированной поверхности кремния (SALDI – Surface Assisted Laser Desorption and Ionization) излучением длин волн 351 нм и 263 нм. Активная поверхность эмиттера ионов формируется непосредственно в вакуумной камере масс-спектрометра в результате лазерного воздействия на неё. Рассмотрена возможность расширения класса соединений, анализируемых методом SALDI, используя канал фотоионизации на поверхности эмиттера ионов с применением импульсного лазерного излучения на длине волны 263 нм.

A.V. PENTO<sup>1</sup>, A.R. MUKHAMATNUROVA<sup>1,2</sup>, I.I.KUZMIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)*

<sup>3</sup>*Vernadsky institute of geochemistry and analytical chemistry RAS, Moscow*

## **DESORPTION OF ORGANIC COMPOUND IONS FROM A NANOSTRUCTURED SILICON SURFACE BY 351 AND 263 NM PULSED LASER RADIATION**

Experimental results of 351 and 263 nm pulsed laser desorption of organic compounds from a nanostuctured silicon surface are presented (SALDI – Surface Assisted Laser Desorption and Ionization). A SALDI-active layer is being produced on a surface of crystalline silicon inside a vacuum chamber of a mass-spectrometer under pulsed laser irradiation. The possibility of expanding the range of compounds that could be successfully analyzed by the SALDI method using a photoionization channel on the surface by the 4th harmonic of Nd:YLF laser radiation is considered.

Процесс лазерной десорбции ионов органических соединений со специально подготовленной поверхности исследуется во многих работах. Этот процесс в англоязычной литературе принято называть SALDI - Surface Assisted Laser Desorption and Ionization. Образовавшиеся в этом процессе ионы регистрируются масс-спектрометром. Процесс образования

иона связан с передачей протона и образованием иона  $(M+H)^+$ . Наиболее эффективными эмиттерами ионов оказались подложки из материалов на основе кремния.

Вероятность ионизации в методе SALDI ограничена основностью детектируемых соединений, для анализа веществ с основностью ниже 850 кДж/моль [1] применение SALDI оказывается неэффективным. В данной работе рассматривается возможность расширения метода SALDI за счет использования канала фотоионизации на поверхности УФ излучением (4 гармоника).

В работе использовались подложки-эмиттеры ионов SALDI, получаемые непосредственно в камере масс-спектрометра за счет лазерного переплава поверхности монокристаллического кремния, приводящего к образованию аморфного и нанокристаллического слоя [2]. Эксперименты проводились для ряда летучих соединений с различной основностью.

При использовании излучения 351 нм были зарегистрированы характерные SALDI масс-спектры, основным пиком в которых является ион  $[M+H]^+$ . Эффективность ионизации падала с уменьшением основности соединения. При облучении подложки излучением 263 нм регистрируются в основном молекулярные ионы, а протонированные ионы появляются в спектре только при плотностях энергии лазера, близких к порогу плавления кремния, причём эффективность образования молекулярного иона определяется, в основном, сечением поглощения молекулы на длине волны 263 нм.

Для соединений с низкой основностью (менее 800 кДж/моль), но обладающих при этом заметным поглощением на длине волны 263 нм, вероятность образования ионов  $M^+$  выше, чем  $[M+H]^+$  на порядок и более. Таким образом применение двух частот для лазерной десорбции принципиально расширяет возможности метода.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-32-01018.

#### *Список литературы*

- [1] Alimpiev S., Grechnikov A., Sunner J., Karavanskii V., Simanovsky Y., Zhabin S., Nikiforov S. On the role of defects and surface chemistry for surface-assisted laser desorption ionization from silicon // J. Chem. Phys. – 2008. – Т. 128, № 1. – С. 014711-014719.
- [2] Гречников А. А., Алимпиев С. С., Никифоров С. М., Симановский Я. О. Способ формирования эмиттера ионов для лазерной десорбции-ионизации химических соединений // Патент РФ № 2426191. 2011.

А.И.СИДОРОВ<sup>1</sup>, А.Б.БУХАРИНА<sup>2</sup>, А.В.ПЕНТО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва,  
Россия

## **МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПИРТОВ С ИОНИЗАЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ В ГАЗАХ**

Предложен новый метод ионизации для масс-спектрометрического анализа биологических объектов при атмосферном давлении с использованием ультрафиолетового излучения лазерной плазмы. Получены результаты анализа паров спиртов в аргоне, азоте и в воздухе. На примере анализа человеческого выдоха показана возможность идентификации эндогенного этанола.

A.I.SIDOROV<sup>1</sup>, A.B. BUKHARINA<sup>2</sup>, A.V. PENTO<sup>2</sup>,

<sup>2</sup> National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute),  
Moscow, Russia

<sup>1</sup> Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow, Russia

## **MASS-SPECTROMETRY ANALYSIS OF ALCOHOL WITH LASER PLASMA IONISATION AT ATMOSPHERIC PRESSURE**

A new ionization method by ultraviolet laser plasma emission was proposed for mass-spectrometry analysis of biological objects at atmospheric pressure. There was carried out an analysis of alcohol mass-spectrum in argon, nitrogen and air. Capabilities of endogenous ethanol identification were demonstrated in the case of human out-breath.

Разработан новый метод масс-спектрометрического анализа биологических объектов в газовой фазе в режиме реального времени при атмосферном давлении [1]. В этом методе поток исследуемого вещества в газовой фазе ионизируется УФ излучением лазерной плазмы. Одним из интересных объектов анализа может быть выдыхаемый воздух. Выдыхаемый воздух содержит множество летучих органических соединений, спектр которых зависит от состояния здоровья человека.

Для изучения возможностей метода были проведены эксперименты для исследования процесса ионизации спиртов в разных газах. Многие спирты являются участниками важных биохимических процессов, происходящих в живом организме. Получены и проинтерпретированы масс-

спектры этанола, изопропанола, третбуанола и изобутанола. Выделены основные каналы ионизации. Получены масс-спектры выдыхов. Показана возможность идентификации эндогенного этанола в выдохе.

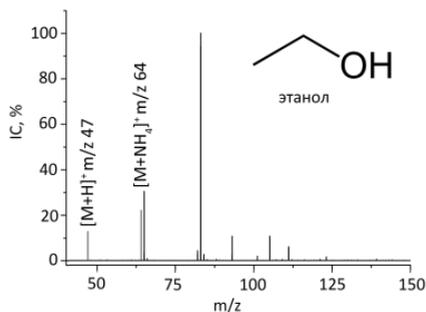


Рис. 1. Масс-спектр этанола в воздухе.

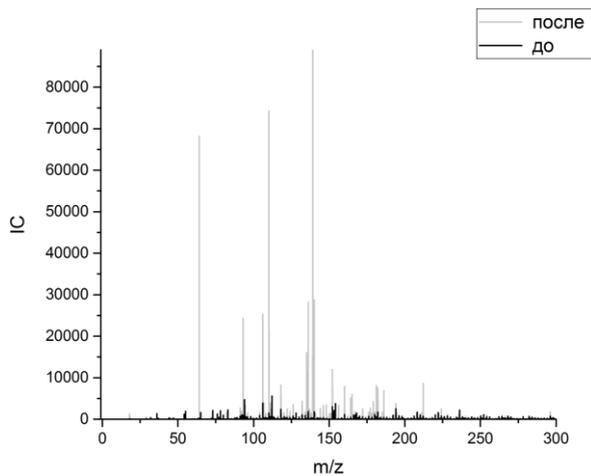


Рис. 2. Масс-спектры выдыхаемого воздуха в аргоне до и после употребления 10 мг спирта.

*Список литературы*

[1] Pento A. V. et al. //Quantum Electronics. 2013. Т. 43. №. 1. С. 55.

А.Р. МУХАМАТНУРОВА<sup>1</sup>, А.В. ПЕНТО<sup>2</sup>, И.И. КУЗЬМИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>3</sup>*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва*

## **МАСС-СПЕКТРОМЕТР С ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ДВУХЧАС- ТОТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДЕСОРБЦИЕЙ ИОНОВ ОРГАНИЧЕ- СКИХ СОЕДИНЕНИЙ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ**

Представлен лазерный масс-спектрометр рефлектрон, позволяющий реализовать режим двухимпульсной двухчастотной десорбции ионов с наноструктурированной поверхности кремния для метода SALDI (Surface Assisted Laser Desorption and Ionization). Для десорбции ионов могут быть использованы длины волн лазерного излучения 523 нм, 351 нм и 263 нм. Активный поверхностный слой эмиттера ионов формируется на поверхности кристаллического кремния непосредственно в вакуумной камере масс-спектрометра в результате лазерного воздействия на неё. Приведены результаты экспериментов для двух режимов десорбции ионов: с использованием одночастотного одноимпульсного и двухчастотного двухимпульсного воздействий на активную поверхность эмиттера ионов.

A.R. MUKHAMATNUROVA<sup>1</sup>, A.V. PENTO<sup>2</sup>, I.I.KUZMIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*National research nuclear university MEPHI (Moscow engineering physics institute)*

<sup>2</sup>*Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow*

<sup>3</sup>*Vernadsky institute of geochemistry and analytical chemistry RAS, Moscow*

## **A MASS SPECTROMETER FOR TWO PULSE TWO FRE- QUENCY LASER DESORPTION OF IONS OF ORGANIC COMPOUNDS FROM NANOSTRUCTURED SILICON SUR- FACE**

A laser mass spectrometer reflectron for two-pulse two-frequency mode implementation in SALDI (Surface Assisted Laser Desorption and Ionization) is described in details. 523 nm, 351 nm and 263 nm pulsed laser radiation is used for desorption of ions. A SALDI-active layer is being produced on a surface of crystalline silicon inside the vacuum chamber of the mass-spectrometer under pulsed laser irradiation. The experimental results for two modes of desorption of ions from the emitter active layer are presented: for single pulse single frequency and for two pulse two frequency modes.

Описываемый времяпролётный масс-спектрометр рефлектрон предназначен для регистрации ионов, образующихся в результате процесса

SALDI - Surface Assisted Laser Desorption and Ionization. В этом процессе молекулы органических соединений адсорбируются в вакууме из газовой фазы на наноструктурированную поверхность кремния, затем импульсным лазерным излучением десорбируются в виде ионов. Метод может быть эффективно применён для детектирования соединений с энергией сродства к протону более 850 кДж/моль [1].

Прибор оснащён вакуумными шлюзами для замены кремниевых подложек-эмиттеров ионов и ячеек Кнудсена с исследуемой пробой, предусмотрена подача исследуемой пробы через газовый хроматограф. Ионный источник масс-спектрометра выполнен по схеме Вили-МакЛарена с двумя сетками и задержанной экстракцией ионов. Прибор допускает работу как в рефлекторном, так и в линейном времяпролётном режиме. Для десорбции ионов используются два лазера Nd:YLF с генераторами гармоник. Может быть использовано излучение второй (523 нм), третьей (351 нм) и четвёртой (263 нм) гармоник. Система синхронизации позволяет изменять задержку между десорбирующим лазерным и ускоряющим высоковольтным импульсами для достижения максимального разрешения прибора по массам. Кроме того, возможно изменение положения во времени десорбирующих лазерных импульсов друг относительно друга в режиме двухимпульсного двухчастотного воздействия на поверхность эмиттера ионов.

Приведены масс-спектры, полученные при работе прибора в различных режимах, показан эффект применения двухимпульсного лазерного воздействия на поверхность эмиттера ионов.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-32-01018.

#### *Список литературы*

- [1] Alimpiev S., Grechnikov A., Sunner J., Karavanskii V., Simanovsky Y., Zhabin S., Nikiforov S. On the role of defects and surface chemistry for surface-assisted laser desorption ionization from silicon // J. Chem. Phys. – 2008. – Т. 128, № 1. – С. 014711-014719.

А.С. ЩЕКИН, Д.В. ПАНОВ, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, К.Л. СЕРГЕЕВ,  
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.А. ИВАНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ОБРАБОТКА КЕРАМИКИ AlN ИМПУЛЬСНО- ПЕРИОДИЧЕСКИМ Nd:YVO<sub>4</sub> ЛАЗЕРОМ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 532 НМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ**

Найдены зависимости испаряемого объема керамики AlN от различных параметров лазерного излучения. Исследованы некоторые закономерности восстановления нитрида алюминия до металла под действием лазерного излучения. Измерены значения проводимости получаемого слоя алюминия при различных стратегиях и режимах обработки.

A.S. SCHEKIN, D.V. PANOV, E.D. ISHKINYAEV,  
K.L. SERGEEV, V.N. PETROVSKIJ, A.A. IVANOV

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

## **AlN CERAMICS PROCESSING USING PULSE-PERIODIC Nd: YVO<sub>4</sub> LASER WITH A WAVELENGTH OF 532 NM FOR PRODUCTION OF A METALLIC CONDUCTIVE LAYER**

The dependences of the evaporated volume of AlN ceramics on various laser radiation parameters were found. Some regularities of the reduction of aluminum nitride to a metal under the action of laser radiation were investigated. The conductivity values of the resulting aluminum layer were measured for various strategies and processing modes.

Керамика AlN представляет особый интерес для промышленности, в частности для микроэлектроники, так как эта керамика обладает свойством образовывать проводящие структуры на поверхности по средствам разложения нитрида алюминия на алюминий и азот под действием лазерного излучения на поверхность материала

Эта технология может быть полезна при изготовлении печатных плат и различных типов датчиков, а также для производства метаматериалов.

Основной причина появления металлического слоя является жидкая фаза абляции керамики. Под действием температуры происходит быстрое испарение и разложение AlN на составные части - Al и N в газообразной

форме, при этом создается большое давление этих газов на нижние слои, где преобладает жидкая фаза абляции, что приводит к появлению металлического Al на поверхности керамики и на изолирующей подложке появляется проводящий слой [1]. При этом ещё неизвестно, какие закономерности связывают образование такого слоя и различные параметры лазерного излучения.

В данной работе использовался твердотельный импульсно-периодический Nd:YVO<sub>4</sub> лазер с преобразованием во вторую гармонику. Максимальная средняя мощность выходного излучения 10 Вт, длительность импульса 50 нс. Эксперименты проводились в воздушной и аргоновой средах.

При обработке материалов данным типом лазером происходит абляция материала, поэтому для создания проводящих слоёв в изолирующем материале важно знать, как зависит объём испаряемого материала от режимов обработки. Для этого были построены необходимые зависимости.

Ключевую роль в проводящих слоях играет проводимость данного слоя. В данной работе проводимость слоя измерялась методом Ван дер Пау и были получены зависимости величины проводимости от параметров обработки.

Также при помощи рентгенофлуоресцентного анализа, реализованного в растровом микроскопе, были получены спектры состава получаемого проводящего слоя и сделаны соответствующие снимки (рис. 1).

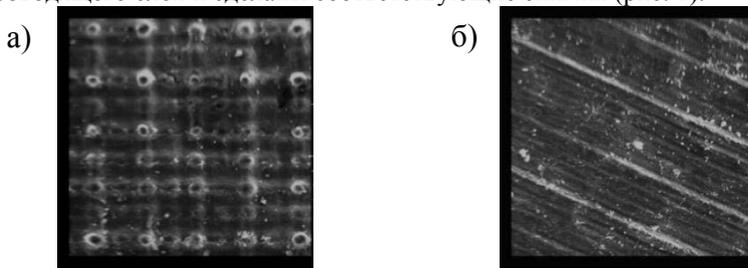


Рис. 1. Вид поверхностей металлизированного слоя на поверхности керамики AlN. а) в воздухе; б) в аргоне

*Список литературы*

- [1] Arkadiusz J. Antończak, Paweł E. Koziol, Bogusz Stępak, Patrycja Szymczyk, Krzysztof M. Abramski, "Direct selective metallization of AlN ceramics induced by laser radiation," Proc. SPIE 8968, Laser-based Micro- and Nanoprocessing VIII, 896814

А.Т. СААКЯН<sup>1</sup>, А.А. КОЛОГРИВОВ<sup>1</sup>, Т.Т. КОНДРАТЕНКО<sup>1</sup>, В.Н. ПУЗЫРЁВ<sup>1</sup>, А.Н. СТАРОДУБ<sup>1</sup>, А.А. ФРОНЯ<sup>1,2</sup>, О.Ф. ЯКУШЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОЙ НА УСТАНОВКЕ «КАНАЛ-2»**

Проведены сравнительные измерения гидродинамической эффективности взаимодействия лазерного излучения с управляемой когерентностью с плазмой как на основной частоте (1.06 мкм), так и на частоте второй гармоники (0.53 мкм). В качестве мишеней использовались сплошные пластины из алюминия и меди. В этих же экспериментах были проведены исследования пространственного распределения рассеянного плазмой излучения.

A.T. SAHAKYAN<sup>1</sup>, A.A. KOLOGRIVOV<sup>1</sup>, T.T. KONDRATENKO<sup>1</sup>,  
V.N. PUZYREV<sup>1</sup>, A.N. STARODUB<sup>1</sup>, A.A. FRONYA<sup>1,2</sup>,  
O.F. YAKUSHEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI*

## **STUDY OF THE HYDRODYNAMIC EFFICIENCY OF LASER- PLASMA INTERACTION AND SPATIAL SCATTERING OF RADIATION BY PLASMA ON INSTALLATION «KANAL-2»**

Comparative measurements of the hydrodynamic efficiency of the interaction of laser radiation with controllable coherence with plasma at both the fundamental frequency (1.06 μm) and the second harmonic frequency (0.53 μm) were made. Solid aluminum and copper plates were used as targets. In these experiments the spatial distribution of the radiation scattered by the plasma was investigated.

Комплексные исследования гидродинамических явлений, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, имеют большую важность, поскольку основным параметром, определяющим стадию абляции, является гидродинамическая эффективность или отношение энергии испарённой части мишени к полной энергии воздействующего

лазерного излучения [1, 2]. Чем выше гидродинамическая эффективность лазерно-плазменного взаимодействия, тем больше затраченной энергии лазерного импульса перешло в энергию лазерной плазмы.

В проведённых на установке «Канал-2» [3] исследованиях было установлено, что в случае облучения плазмы излучением на частоте второй гармоники гидродинамическая эффективность взаимодействия оказывается выше и составляет примерно 10 %. Показано также, что при облучении мишеней из более плотного вещества (меди) как на основной частоте, так и на частоте второй гармоники гидродинамическая эффективность взаимодействия выше, чем для менее плотного (алюминия). Установлено, что практически никакой зависимости гидродинамической эффективности взаимодействия от ширины спектра излучения нет.

Проведённые исследования пространственного распределения рассеянного плазмой излучения показали, что в экспериментах с медными мишенями на основной частоте рассеяние излучения в пространство происходит почти однородно, однако интенсивность рассеянного излучения в вертикальной плоскости почти в два раза больше, чем в горизонтальной, причём форма разлёта скорее похожа на струю в обратном направлении. В экспериментах на частоте второй гармоники форма разлёта практически сферическая, а само рассеяние уже неоднородно и в вертикальной плоскости более интенсивно и более близко к сфере, чем в горизонтальной плоскости.

Для осмысления и интерпретации полученных экспериментальных результатов были проведены теоретические расчёты по разлёту плазмы, согласно работе [4]. По расчётам в проведённых экспериментах должен происходить сферический разлёт плазмы с центром в фокусе лазерного излучения. Однако при сравнении с экспериментальными результатами получается, что для частоты второй гармоники такая картина и наблюдается, однако на основной частоте разлёт далёк от сферического.

#### *Список литературы*

- [1] Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Быковский Ю.А., Крохин О.Н. Лазерная плазма. Физика и применения. // Москва, МИФИ, 2003.
- [2] Афанасьев Ю.В., Басов Н.Г., Крохин О.Н. и др. Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой. Итоги науки и техники. Радиотехника. Том 17. // Москва, ВИНТИ, 1978.
- [3] Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V., Starodub A.N. // J. Russian Laser Research. 2004. V. 25. P. 79.
- [4] Afanasiev Yu.V., Gamaly E.G., Guskov S.Yu., Demchenko N.N., Rozanov V.B. // Laser and Particle Beams. 1988. V. 6. Part 1, PP. 1-23.

В.П.БИРЮКОВ<sup>1</sup>, В.В.ИСАКОВ<sup>2</sup>, А.Ю.ФЕДОТОВ<sup>2</sup>, Д.А.БАУЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

<sup>2</sup>Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ 40Х НА МИКРОТВЕРДОСТЬ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗОН ЗАКАЛКИ**

Представлены металлографические исследования дорожек закалки лучом волоконного лазера ЛС-10 образцов стали 40Х. С помощью полного факторного эксперимента установлено влияние режимов обработки на глубину и ширину зон закалки. Показано, что микротвердость изменяется в пределах 7110-8080 МПа при дефокусировке луча 25-200 мм, скорости перемещения луча 30-40 мм/с и мощности излучения 3000-4000 Вт.

V.P.BIRYUKOV<sup>1</sup>, V.V.ISAKOV<sup>2</sup>, Y.FEDOTOV<sup>2</sup>, D.A.BAULIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal budget-funded research Mechanical Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Science, Moscow

<sup>2</sup>Central Institute of aviation motors named after P. I. Baranov, Moscow

## **INFLUENCE REGIMES LASER HARDENING STEEL 40X ON THE MICROHARDNESS AND GEOMETRICAL PARAMETERS QUENCHING ZONES**

Metallographic studies of the tracks of 40Cr steel samples quenching by a fiber laser beam LS-10 are presented. With the help of a full factorial experiment, the influence of processing modes on the depth and width of the quenching zones is established. It is shown that the microhardness varies in the range of 7110-8080 MPa when the beam is defocused 25-200 mm, the beam speed 30-40 mm/s and radiation power 3000-4000 W.

Образцы из низколегированной стали 4130, представляющие собой пластины 120×40×40 мм, упрочняли [1] расфокусированным лучом волоконного лазера компании IPG. Лучшие результаты получены при мощности излучения 600 Вт, скорости перемещения 8,0 - 10,0 мм/с и величине дефокусировки +50 мм. Среднее значение микротвердости зоны закалки составило 390 НВ, что превышает микротвердость основы в 1,7 раз. С целью увеличения ширины и глубины закаленных зон, на установке ЛС – 4 с использованием сканера IPG 2D, проводилось лазерное упрочнение

образцов из стали 40ХН2МА. Получены закаленные дорожки шириной 50 мм и глубиной 0,2 – 2,0 мм при мощности излучения 2000 Вт. Микротвердость упрочненных зон составила 6410 - 7340 МПа или 56 – 60 HRC [2].

Целью настоящей работы является определение оптимальных режимов лазерного упрочнения локальных поверхностей, кромок штампов, зубчатых передач, шпоночных пазов и др. Исследовали влияние дефокусировки луча  $L=25-200$  мм, скорости его перемещения  $V=30-40$  мм/с и мощности  $P=3000-4000$  Вт на размеры глубины  $h$  и ширины  $b$  зон закалки. На рис. 1 представлены полученные зависимости глубины и ширины зон закалки для выбранных режимов обработки.

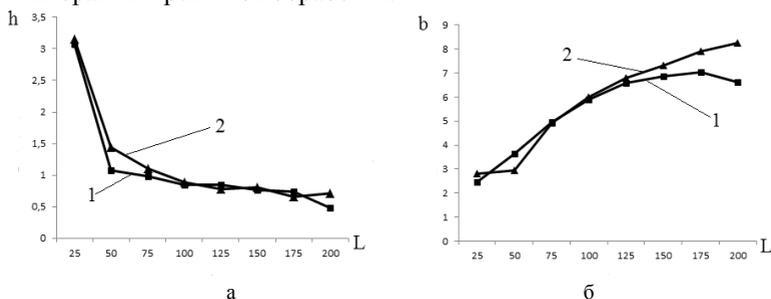


Рис. 1. Зависимость глубины (а) и ширины (б) зон закалки от дефокусировки лазерного луча: 1-  $P=3000$  Вт,  $V=30$  мм/с, 2-  $P=4000$  Вт,  $V=40$  мм/с.

При дефокусировке луча на 75-150 мм, мощность излучения и скорость обработки устанавливали таким образом, чтобы погонная энергия составляла постоянную величину 100 Дж/мм. Это приводит к линейной зависимости глубины и ширины зон закалки от величины дефокусировки. Применение линейных уравнений регрессии показало незначительное расхождение расчетных и экспериментальных значений, которое не превышает 5%. Для всех исследуемых режимов лазерного упрочнения, микротвердость закаленных зон находится в диапазоне от 7110 до 8080 МПа.

#### Список литературы

- [1] Oliveira R.J.B. et al. Microstructure and wear behaviour of laser hardened SAE 4130 steels. Int. J. Surface Science and Engineering, Vol. 12, No. 2, 2018. P.161-170.
- [2] Бирюков В.П., Фишков А.А., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В. Влияние лазерного упрочнения круглым, профилированным и колеблющимся лучом на повышение ресурса работы деталей машин //ФОТОНИКА. 2017. №3. С.28-34.

Л.И. БРЮКВИНА<sup>1</sup>, Н.А. ИВАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт лазерной физики СО РАН (Иркутский филиал), Россия*

<sup>2</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия*

## **РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ LiF:OH, Mg**

Для создания лазерных  $F_2^+$  подобных центров в кристаллах LiF:OH, Mg производилось облучение образцов  $\gamma$ -излучением при температуре 80К. При низкотемпературном облучении, когда отсутствует движение вакансий, не создаются сложные агрегатные точечные дефекты. Последующее нагревание до 300К и выдержка при этой температуре позволили создать максимальную концентрацию  $F_2^+$ -и  $F_2^{2+}$ -подобных лазерных центров. Накопление  $F_2^+$ -и  $F_2^{2+}$ -подобных центров регистрировалось по спектрам поглощения. Одновременно изучалось преобразование молекулярных примесных водородных и кислородных комплексов, которые являются ловушками электронов.

L.I. BRYUKVINA<sup>1</sup>, N. A. IVANOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Irkutsk Division of Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of the RAS, Russia*

<sup>2</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Russia*

## **RADIATION-CHEMICAL TRANSFORMATIONS OF LASER COLOR CENTERS AFTER LOW-TEMPERATURE IRRADIATION OF LiF:OH, Mg CRYSTALS**

To create laser  $F_2^+$ -like centers in LiF:OH, Mg crystals, samples were irradiated with  $\gamma$ -radiation at a temperature of 80K. Under low-temperature irradiation, when there is no movement of vacancies, complex aggregate point defects are not created. Subsequent heating to 300K and holding at this temperature allowed the creation of the maximum concentration of  $F_2^+$  and  $F_2^{2+}$ -like laser centers. The accumulation of  $F_2^+$  and  $F_2^{2+}$ -like centers was recorded by absorption spectra. At the same time, the transformation of molecular impurity hydrogen and oxygen complexes, which are electron traps, was studied.

Для создания лазерных  $F_2^+$  центров окраски (ЦО) в кристаллах LiF предпринимаются специальные меры, такие как выращивание кристаллов с добавлением примесей ионов гидроксидов ( $OH^-$ ) и магния ( $Mg^{2+}$ ), а также низкотемпературное облучение. В исследованиях, проведенных нами, используются все эти методики, особенное внимание уделяется обогащению

нию расплава фторида лития гидроксидом и низкотемпературному облучению кристаллов [1-5].

Концентрация молекулярных комплексов с водородной связью (МК с Н-связью) и  $U_1$ -центров, поглощающих в ИК области  $1950-2350\text{ см}^{-1}$ , образованных после низкотемпературного облучения кристалла, начала уменьшаться (рис. 1), в то время как концентрация  $F_2^+$  центров окраски увеличивалась.

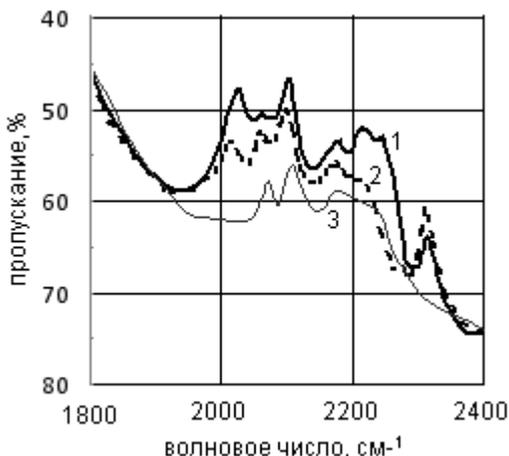


Рис. 1. Спектры ИК пропускания кристалла LiF:OH, Mg,  $\gamma$ -облученного до дозы  $3.4 \times 10^3$  Кл/кг при  $T=80\text{K}$ : 1- образец, облученный при 80K, вынутый из азота и сразу измеренный, 2 – через 30 мин после хранения при 300 K, 3 – через год после хранения при 300 K. Темп. измерения 300K.

Эта экспериментальная зависимость позволяет считать, что МК с Н-связью играют роль ловушек электронов. Вследствие этого концентрация положительно-заряженных ЦО увеличивается синхронно с уменьшением концентрации МК с Н-связью после низкотемпературного облучения.

#### Список литературы

- [1] С. А. Небогин, Л. И. Брюквина, Н. А. Иванов, М. Д. Зимин, Химическая физика, 2018, Т. 37, № 4, С. 11-19.
- [2] L. Bryukvina, N. Ivanov, S. Nebogin, J. Phys. Chem. Sol., 2018, Vol. 120, P. 133-139.
- [3] N. A. Ivanov, L. I. Bryukvina, D. S. Glazunov, IOP Conf. Series: J.of Physics: Conf. Series (6th International Congress “Energy Fluxes and Radiation Effects”), 2018, Vol. 1115, P. 052031.
- [4] С.А.Небогин, Л.И. Брюквина, Н.А. Иванов, Д.С. Глазунов, Физика твердого тела, 2017, Т. 59, вып.6, С. 1119-1124.
- [5] Lyubov I. Bryukvina, Nikolay A. Ivanov, J of fluorine chemistry, 2016, Vol. 192 Part A, P. 124-130.

В.А. ХОХЛОВ<sup>1</sup>, Н.А. ИНОГАМОВ<sup>1,2</sup>, В.В. ЖАХОВСКИЙ<sup>2,1</sup>,  
Ю.В. ПЕТРОВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт теоретической физики РАН им. Л.Д. Ландау, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им.*

*Н.Л. Духова, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный Московской области,  
Россия*

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТЬ И ПРИ ЛАЗЕРНОМ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ПИННИНГЕ**

К числу важнейших современных лазерных технологий относятся (1) генерация коллоидов наночастиц (НЧ) при лазерной абляции в жидкость (LAL - laser ablation in liquid) и (2) поверхностное упрочнение изделий путем лазерного пиннинга (LSP - laser shock peening). Существенно то, что при лазерном пиннинге обрабатываемая поверхность омывается водой. Поэтому физика процессов при абляции в жидкость и при пиннинге оказывается общей. Правда, акценты здесь разные. Если при абляции в жидкость фактически забывают об ударной волне (УВ), порожденной воздействием, и уходящей в толщу мишени, то в проблеме с пиннингом, наоборот, главным является вопрос об ударном воздействии. Кроме того, роль воды в (1) и (2) разная. В (1) жидкость способствует формированию НЧ и принимает НЧ, мягко тормозя их. Тогда как в (2) вода нужна, чтобы усилить отдачу от лазерного воздействия на изделие и, т.о., увеличить амплитуду УВ в изделии. Полная картина, разрабатываемая в работе, безусловно, должна включать в себя оба края: и формирования выброса в жидкость в результате абляции - т.е. (1), и наблюдение за УВ от стадии зарождения до её затухания в объеме изделия, т.е. (2).

**V.A. KHOKHLOV<sup>1</sup>, N.A. INOGAMOV<sup>1,2</sup>,  
V.V. ZHAKHOVSKY<sup>2,1</sup>, Yu.V. PETROV<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*L.D. Landau Institute for Theoretical Physics of RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Dukhov Research Institute of Automatics (VNIA), Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

## **PHYSICAL PROCESSES DURING LASER ABLATION INTO A LIQUID AND DURING LASER SHOCK-WAVE PINNING**

The most important modern laser technologies include (1) the generation of colloid nanoparticles (NPs), laser ablation into a liquid (LAL—laser ablation in liquid) and (2) surface hardening of products by laser pinning (LSP—laser shock peening). Significant-

ly, with laser pinning, the surface to be treated is washed with water. Therefore, the physics of processes during ablation into a liquid and during pinning is common. True, the accents are different. If during ablation into a fluid, they actually forget about the shock wave (SW) generated by the action, and reaching the target, then the problem with pinning, on the contrary, is the main issue of impact. In addition, the role of water in (1) and (2) is different. In (1), the fluid contributes to the formation of low frequencies and takes low frequencies, gently slowing them down. Whereas in (2) water is needed to enhance the recoil and increase the amplitude of the hydrocarbon in the product. The full picture, developed in the work, of course, should include both edges: and the formation of release into the fluid as a result of ablation—i.e. (one), and observation of the HC from the stage of nucleation to its attenuation in the volume of the product, i.e. (2).

Рассматривается действие единичного ультракороткого лазерного импульса на тонкую (~50-100 нм) золотую пленку, напыленную на стеклянную подложку. Лазерный пучок сфокусирован в малое пятно, размер которого (~1 мкм) определяется дифракционным пределом.

Лазерное воздействие уже достаточно давно применяется для генерации ударных волн в конденсированных средах. Традиционная ветвь этих применений связана с уточнением уравнений состояния (УРС) при высоких плотностях энергии, недостижимых при использовании химических взрывчатых веществ.

Другая ветвь связана с современной технологией лазерного пиннинга.

С помощью пиннинга существенно (на десятки, сотни процентов) повышают стойкость к износу (усталостное разрушение) и сопротивляемость к коррозии. Например, упрочняют детали авиационных двигателей.

В данной работе мы хотим обратить внимание на существенные общие явления для таких разных технологий, как лазерный пиннинг и абляция в жидкость. При этом соответствующие научные сообщества в значительной степени разобщены. Близкие опыты интерпретируются по-разному. В опытах по пиннингу формирование кратера связывают с остаточными пластическими деформациями (пренебрегают абляцией). Тогда как в опытах с абляцией считают, что кратер образуется вследствие уноса вещества в жидкость, т.е. пренебрегают механикой деформации твердого тела под поверхностью кратера. При этом длительности импульса наносекундные, а интенсивности сопоставимые 1-10 ГВт/см<sup>2</sup> в обеих технологиях; для усиления эффекта обычно работают в районе порога оптического пробоя жидкости.

В.Б. ПАРФЕНТЬЕВА<sup>1,2</sup>, А.Д. ЗВЕРЕВ<sup>2,3</sup>, В.А. КАМЫНИН<sup>2</sup>,  
А.И. ТРИКШЕВ<sup>2</sup>, В.Г. ВОРОНИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛОКОННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ И СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ВОЛОКОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Созданы интерферометры Майкельсона и Маха-Цандера в волоконном исполнении. Представлены экспериментальные результаты по получению интерференции в волоконных оптических схемах с использованием суперлюминесцентного источника излучения и импульсного лазера в качестве источников излучения.

V.B. PARFENTYEVA<sup>1,2</sup>, A.D. ZVEREV<sup>2,3</sup>, V.A. KAMYININ<sup>2</sup>,  
A.I. TRIKSHEV<sup>2</sup>, V.G. VORONIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National research nuclear university MEPHI (Moscow engineering physics institute)

<sup>2</sup>Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University

## **OPTOMOZATION OF FEBER INTERFEROMETERS WITH PULSED LASERS AND BROADBAND AMPLIFIED SPONTA- NEOUS EMISSION SOURCE**

Created fiber versions of the Michelson and the Mach-Zehnder interferometers. Presents the results of experiments of obtaining interference in the fiber optical systems with broadband amplified spontaneous emission source and pulsed laser as sources of emission.

С развитием волоконной оптики появился новый класс оптических интерферометров – волоконные, которые позволяют проводить высокоточные измерения параметров оптических систем, используемых как в промышленности, так и в медицине. Однако создание эффективных и надежных приборов на основе волоконных интерферометров сопряжено с немалым количеством специфических вопросов и проблем.

Целью работы является создание волоконных интерферометров Майкельсона[1] и Маха-Цандера[2], проведение экспериментов по получению интерференции с использованием различных источников излучения, а

также оптимизация параметров систем по результатам экспериментов. В установке на основе интерферометра Майкельсона в качестве источника излучения используется суперлюминесцентный волоконный источник инфракрасного излучения с активной средой из волокна, легированного ионами  $\text{Er}^{3+}$ , ширина спектра излучения источника составляет 100нм в диапазоне от 1500нм до 1600нм. Для калибровки линии задержки установки проведен эксперимент по получению интерференции при френелевском отражении от торцов волокна. Путем подстройки линии задержки выставлена одинаковая длина плеч и интерференцию можно было наблюдать на оптическом спектральном анализаторе (рис. 1).

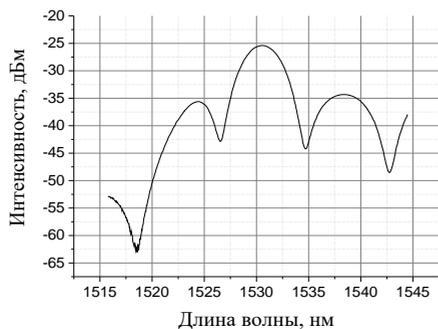


Рисунок 1. Интерферограмма, полученная на интерферометре Майкельсона

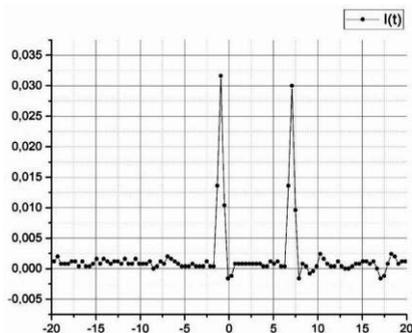


Рисунок 2. Осциллограмма, полученная на интерферометре Маха-Цандера с импульсным лазером

Волоконный интерферометр Маха-Цандера просвечивался излучением импульсного лазера и наблюдалось раздвоение импульса (рис. 2). Основываясь на результатах эксперимента, разность длин плеч была уменьшена и расстояние между импульсами существенно сократилось. Для более точной оценки значения разности длин плеч через интерферометр пропускалось излучение от суперлюминесцентного волоконного источника инфракрасного излучения и получалась интерференционная картина. В результате проделанной работы разность длин плеч была уменьшена до 363мкм.

#### Список литературы

- [1] Zhang Ting, Yang Zhi, et. al. // Chinese optics letters. 2010. V.8 (3). P.262-265.
- [2] Г. Воронин, В.А. Камынин, «Полностью волоконный лазер с внутрирезонаторным интерферометром Маха-Цандера» Прикладная фотоника Т. 2, №2, 135-143, 11.06.2015.

Д.В. ПАНОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.О. АНДРЕЕВ,  
Д.В. УШАКОВ, П.С. ДЖУМАЕВ, В.И. ПОЛЬСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ И ДИСИЛИКАТА ЛИТИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Проведены электронно-микроскопические исследования образцов двух типов керамик: на основе дисиликата лития и диоксида циркония, с целью выявления влияния лазерной обработки в различных условиях на микроструктуру материала. Показано, что с увеличением мощности лазерного излучения происходит постепенное увеличение количества дефектов (пор, трещин) в керамиках на границе с областью удаленного лазерной обработкой материала.

D.V. PANOV, V.N. PETROVSKIY, A.O. ANDREEV,  
D.V. USHAKOV, P.S. DZHUMAEV, V.I. POLSKIY

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

## **THE STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF ZIRCONIA AND LITHIUM DISILICATE IN THE PROCESSING OF UL- TRASHORT LASER PULSES**

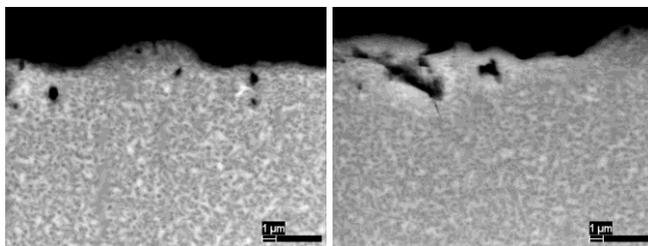
Conducted electron-microscopic study of samples of two types of ceramics: based on disilicate lithium and zirconium dioxide, with the aim of identifying the influence of laser treatment in different conditions on the microstructure of the material.

It is shown that with increasing power of laser radiation there is a gradual increase in the number of defects (pores, cracks) in ceramics at the boundary with the area of remote laser processing of the material.

Для экспериментальных исследований по обработке технологии лазерного фрезерования различных видов керамических материалов использовалась установка на основе импульсного пикосекундного волоконного лазера с гальваносканером. Основные технические характеристики лазерного излучателя: длина волны - 1030 нм, максимальная мощность - 30 Вт, длительность импульсов - (5-20) пс, частота следования импульсов - (20-2000) кГц.

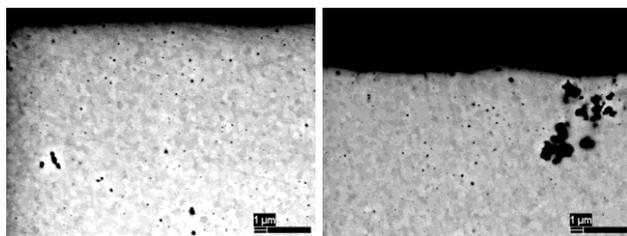
В качестве изучаемого материала были выбраны стеклокерамические блоки дисиликата лития Rosetta SM и тетрагональная предварительно стабилизированная керамика диоксида циркония или Y-TZP керамика.

Проведены электронно-микроскопические исследования образцов двух указанных выше типов керамик с целью выявления влияния лазерной обработки в различных условиях на микроструктуру материала. Ниже на рисунках (1, 2) приведены характерные снимки поперечных шлифов образцов.



а) б)

Рисунок 1 - Структура керамики дисиликата лития после лазерной обработки для разных мощностей лазерного излучения ( $P_a < P_b$ ).



а) б)

Рисунок 2 - Структура керамики диоксида циркония после лазерной обработки для разных мощностей лазерного излучения ( $P_a < P_b$ ).

Из представленных рисунков можно видеть, что с увеличением мощности лазерного излучения происходит постепенное увеличение количества дефектов (пор, трещин) в керамиках на границе с областью удаленного лазерной обработкой материала. Кроме того обнаружено, что в приповерхностном слое керамики на основе дисиликата лития с ростом мощности лазерного излучения происходит локальное изменение структурно-фазового состояния.

В.О. ПОДУСОВСКИЙ, И.С. ЛОГИНОВА, А.Н. СОЛОНИН,  
А.М. ХАЛИЛ

*НИТУ «МИСиС» - Москва, Российская Федерация*

## **ВЛИЯНИЕ Тi И В НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В СПЛАВЕ АА7020 В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

В работе изучено влияние титана и бора на структурообразование в сплаве АА7020 при импульсной лазерной обработке. Содержание титана варьировалось от 0,8 до 3 %. Поверхность экспериментальных сплавов была обработана лазерным излучением мощностью 26,3- 56,2 Вт. После лазерной обработки была проведена термическая обработка. Установлено, что в исходном сплаве без титана и бора в процессе лазерной обработки формируется duplexная структура, состоящая из столбчатых и равноосных кристаллов, выявлено наличие кристаллизационных трещин. При добавлении титана и бора структура исходного сплава становится однородной, полностью состоит из равноосных кристаллов со средним размером 5,8-2,5 мкм, кристаллизационные трещины не образуются. Выявлено, что с увеличением содержания титана и бора от 0,8 до 3 % в сплаве АА7020 твердость повышается от 63 до 82 HV, что связано с уменьшением среднего размера зерна и образованием избыточных дисперсных фаз типа  $Al_3Ti$ .

V.O. PODUSSOVSKIY, I.S. LOGINOVA, A.N. SOLONIN,  
A.M.KHALIL

*NUST "MISiS" – Moscow, Russian Federation*

## **THE IMPACT OF Ti AND B ON AA7020 ALLOY'S STRUCTURE FORMATION DURING LASER TREATMENT**

The impact of Ti and B on the AA7020 alloy's structure formation during pulse laser treatment was studied in current research. Ti content varied from 0,8% to 3%. The surface of experimental alloys was laser treated with average power of 26,3-56,2 W. After laser treatment samples were prone to the heat treatment. It was established, that in the initial Ti and B - free AA7020 alloy duplex structure of columnar and equiaxed grains is formed, the presence of solidification cracks was revealed. After addition of Ti and B the structure of the initial alloy becomes homogeneous and fully consists of the equiaxed grains with average size of 5,8-2,5 mkm, solidification cracking was not formed. It was revealed, that with the increase of Ti and B content from 0,8 to 3% AA7020 alloy's hardness increases from 63 to 82 HV, which is caused by the decrease of average grain size and the formation of excessive dispersed phases of  $Al_3Ti$ .

Сплавы системы Al-Zn-Mg относятся к высокопрочным алюминиевым

сплавам и представляют большой интерес в качестве материала для аддитивных технологий [1-3]. Однако эти сплавы характеризуются низкой свариваемостью из-за широкого эффективного интервала кристаллизации (ЭИК) равного 200 °С [4]. В данной работе было изучено влияние Ti и В на структурообразование сплава AA7020 в условиях лазерной обработки

Поверхность экспериментальных сплавов была обработана лазером при мощности 26,3 кВт; 31,3 кВт; 36,7 кВт; 42,7 кВт; 49,1 кВт; 56,2 кВт с помощью установки МУЛ-1, оснащенной импульсным твердотельным Nd:YAG лазером с длиной волны 1064 нм. Термическую обработку обработанных сплавов проводили в две стадии: отжиг при температуре 500°С, закалка в воду и двухступенчатое старение при температурах 100°С и 175°С. Микроструктуру образцов исследовали с помощью СЭМ Tescan VEGA 3LMH. Микротвердость образцов измеряли на лабораторном оборудовании WOLPERT MICRO VICKERS TESTER 402-MVD.

Было выявлено, что в немодифицированном состоянии микроструктура обработанной лазером зоны состоит из крупных зерен, наблюдается присутствие кристаллизационных трещин. При наличии в сплаве модификаторов размер зерна существенно уменьшается, кристаллизационные трещины не образуются.

Уменьшение склонности к трещинообразованию вызвано тем, что в присутствии модификатора частицы  $TiB_2$  создают множество центров кристаллизации твердых фаз, что приводит к равномерному перераспределению жидкости и снижению склонности сплавов к образованию кристаллизационных трещин. Также было установлено, что титан и бор уменьшают ЭИК сплава AA7020 на 7-13 °С.

Увеличение твердости от 63 до 82 HV с увеличением содержания титана и бора от 0,8 до 3 % в сплаве AA7020 связано с уменьшением среднего размера зерна и образованием избыточных дисперсных фаз  $Al_3Ti$ .

#### *Список литературы*

- [1] P. Wang, H.C. Li, K.G. Prashanth Selective laser melting of Al–Zn–Mg–Cu: Heat treatment, microstructure and mechanical properties// Journal of Alloys and Compounds – 2017 № 707 P. 287 – 290.
- [2] S.Griffiths, M.D. Rossell, J. Croteau, N.Q. Vo, D.C. Dunand, C. Leinenbach Effect of laser rescanning on the grain microstructure of a selective laser melted Al-Mg-Zr alloy// Materials Characterization – 2018.
- [3] Mohamed A. Afifi, Ying Chun Wang, Pedro Henrique R.Pereira Effect of heat treatments on the microstructures and tensile properties of an ultrafine-grained Al-Zn-Mg alloy processed by ECAP// Journal of Alloys and Compounds – 2018 vol. 749 P. 567 – 574.
- [4] Cassiopée Galy, Emilie Le Guen, Eric Lacoste, Corinne Arvieu Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences// Additive manufacturing – 2018 vol. 22 P. 165 – 175.

В.П. БИРЮКОВ<sup>1</sup>, Т.А. БАЗЛОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

## ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА МЕДНЫХ СПЛАВОВ НА СТАЛЬ

В работе рассмотрен процесс наплавки порошка ПР-БрАМц 9-2 на образцы стали 40Х с применением излучения непрерывного СО<sub>2</sub>-лазера. Исследовано влияние поперечных колебаний луча на качество и производительность процесса наплавки. Показано, что при частоте сканирования луча 220Гц производительность наплавки повышается в 1,5 раза.

V. P.BIRYUKOV<sup>1</sup>, T.V. BAZLOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal budget-funded research Mechanical Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Science, Moscow

<sup>2</sup>National research technological University "MISIS", Moscow

## LASER CLADDING OF COPPER ALLOYS ON STEEL

The paper discusses the process of cladding powder PG BrAMc 9-2 on samples of steel 40X with the use of radiation of a continuous CO<sub>2</sub>-laser. The influence of transverse vibrations of the beam on the quality and performance of the surfacing process is studied. It is shown that the deposition rate increases by 1.5 times at the beam scanning frequency of 220 Hz.

Лазерную наплавку медного слоя проводили проволокой МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 диаметром 1,2 мм на стальную пластину СтЗсп толщиной 7 мм [1]. В качестве источника лазерного излучения использовали волоконный лазер ЛС-15, оптическую сварочную головку YW50. Микротвердость наплавленного валика при мощности излучения 5 кВт изменяется в пределах 77-115 HV<sub>0,2</sub>, а при мощности излучения 10 кВт - 77 – 330 HV<sub>0,2</sub>. Эксперименты проводились с использованием диодного лазера мощностью до 1600 Вт. [2]. Для наплавки выбран порошок бронзы Cu15Sn0,4P с размерами частиц 150 - 180 мкм. В качестве подложки применяли легированную сталь AISI 4340. Твердость бронзового покрытия HV 172±12 и она выше, чем у фосфористой бронзы 110 HV. В наших экспериментах применялась лазерная установка «Комета - М»[3]. Для наплавки выбран порошок бронзы ПР-БрАМц 9-2. Образцы изготавливали из стали 40Х с размерами 15 x 20 x 80 мм. Присадочный порошковый материал наносил-

ся на образцы в виде обмазки. В качестве связующего вещества использовался водный раствор окиэтилцеллюлозы. Толщина слоя составляла 0,9-1,0 мм. Структура и химический состав наплавленных слоев исследовались на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH. На рис. 1(а и б) представлены микрошлифы наплавленных дорожек с размерами 0,75×2,1 мм, твердостью (181-208HV), и 0,68×3,38 мм - (204-224HV), полученных расфокусированным лучом и сканирующим с частотой 220Гц лучом соответственно. Глубина проплавления основы составила 0,38 и 0,15 мм. Трибологические испытания выполнялись на машине трения МТУ-01 по схеме плоскость (наплавленный образец) - кольцо сталь 40X (48-52 HRC). Удельная нагрузка составляла 1-3 Мпа. В качестве смазочного материала использовали масло трансмиссионное ТСЗп-8 .

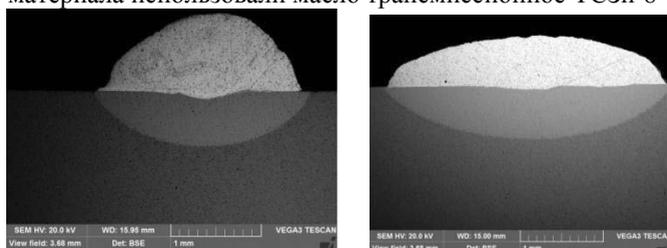


Рис. 1. Наплавка бронзы на сталь×75: а-расфокусированным лучом, б- сканирующим лучом.

Коэффициенты трения изменялись в пределах 0,016-0,022 и 0,014-0,021 при испытании образцов наплавленных расфокусированным и сканирующим лучом соответственно. Установлено, что площадь поперечного сечения наплавленной дорожки сканирующим лучом в 1,5 раза больше, чем расфокусированным лучом при одних и тех же режимах обработки.

#### *Список литературы*

- [3] Цибульский И.А., Климова О.Г., Корсмик Р.С., Ахметов А.Д., Кузнецов М.В. Влияние технологических параметров на взаимное проникновение меди и железа при лазерной наплавке медно-никелевого сплава на сталь //Сварочное производство. 2017. № 4. С. 37-42.
- [4] Arias-González F. et al. Production of phosphor bronze coatings by laser cladding // Procedia Manufacturing. 2017. V.13. pp. 177–182.
- [5] Бирюков В.П., Дозоров А.В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. №1. С. 60-66.

В.П. ГОРДЕЕВ<sup>1</sup>, В.В. БЕЗОТОСНЫЙ<sup>2</sup>, В.А. ОЛЕЩЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕПРЕРЫВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДНЫХ ЛИНЕЙКАХ

Диапазон достигаемой мощности излучения ЛЛД с каждым годом неуклонно увеличивается. В работах [1, 2] сообщалось о создании оригинальной конструкции отечественных непрерывных лазерных линеек с выходной мощностью 60 Вт и квазинепрерывных линеек с выходной мощностью до 300 Вт. Между тем в работе [3] сообщалось о получении рекордной мощности 880 Вт от одной линейки в кратковременном CW режиме, что открывает новые горизонты применений. Получение таких уровней выходной мощности ЛЛД [4-7] в ресурсном режиме затруднено вследствие недостаточной эффективности отведения тепловой энергии. В работе [8] получено ~ 4,6 кВт при использовании метода спектрального суммирования. Применение метода спектрального суммирования требует повышения однородности мощности и спектров излучения кластеров по всей излучающей апертуре ЛЛД. Неоднородности потока тепла и механических напряжений приводят к потере качества излучения лазерных линеек, что существенно ограничивает их выходную мощность и области практических применений. С помощью пакета COMSOL проведено 3D моделирование рабочего режима ЛЛД, собранной на теплоотводящем элементе типа CS-маунт на трёх типах припоев: PbSb, AuSn и In при тепловой нагрузке от 20 до 1000 Вт. Построены профили механических напряжений в плоскости активной области излучающей апертуры лазерного кристалла, по глубине лазерной сборки и по длине резонатора. Обнаружены важные особенности распределения механических напряжений в лазерном кристалле. Проведен анализ и обсуждение полученных результатов для различных конфигураций в зависимости от материала сабмаунта, состава и толщины припоя, мощности тепловой нагрузки.

### Список литературы

- [1]. Bezotosnyi V. V., Kozyrev, A. A.; Kondakova, N. S.; et al. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, **43**, p. 369. 2016.
- [2]. Bezotosnyi, V. V., Kozyrev, A. A., Kondakova, N. S.; et al. Quantum Electronics **47**, Issue: 1, p. 5. 2017.

- [3]. Strohmaier S. G., Erbert, G., Meissner-Schenk, A. H., Lommel, M., Schmidt, B., Kaul, T., Crump, P. KW-class diode laser bars. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. - 2017 г. - 1 : Т. 10086. - стр. 1–6.
- [4]. Безотосный В.В. и др., Квантовая электроника, **44**, 899-902 (2014).
- [5]. Безотосный В.В. и др., Квантовая электроника, **44**, 145-148 (2014).
- [6]. Безотосный В.В. и др. Квантовая электроника, **45**, 1088-1090 (2015).
- [7]. Безотосный В.В. и др. Квантовая электроника, **46**, 679-681 (2016).
- [8]. Huang R. K., Chann, B., Burgess, J., Lochman, B., Zhou, W., Cruz, M., Tayebati, P. Teradiode's high brightness semiconductor lasers. Т. 9730. 2016 г.

С.В. ГЮНТЕР<sup>1</sup>, А.А. САПРЫКИН<sup>2</sup>, Е.А. ИБРАГИМОВ<sup>2</sup>,  
А.А. КЛОПОТОВ<sup>3</sup>, А.И. ПОТЕКАЕВ<sup>1</sup>, Е.С. МАРЧЕНКО<sup>1</sup>,  
Ю.Ф. ЯСЕНЧУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет г. Томск,

<sup>2</sup>Юргинский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Юрга

<sup>3</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

## **ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА**

В материале продемонстрирована возможность получения сварного соединения сверхэластичной тонкой проволоки из сплава на основе никелида титана марки ТН-10 размером менее 100 мкм при помощи лазерной сварки. Проведён сравнительный анализ полученных результатов с дальнейшей перспективой использования лазерной сварки при изготовлении сетчатых металлоконструкций.

S.V. GUNTER<sup>1</sup>, A.A. SAPRYKIN<sup>2</sup>, YU.F. YASENCHUK<sup>1</sup>,  
E.A. IBRAGIMOV<sup>2</sup>, A.A. KLOPOTOV<sup>3</sup>, A.I. POTEKAEV<sup>1</sup>,  
E.S. MARCHENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk,

<sup>2</sup>Yurga Institute of Technology (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Tomsk Polytechnic University", Yurga

<sup>3</sup>Tomsky State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

## **FEATURES OF LASER WELDING OF SUPERELASTIC METAL THIN WIRE OF THE TITANIUM NICKELIDE BASED ALLOY**

The material demonstrated the possibility of obtaining a welded connection of super-elastic thin wire of (TN-10) titanium nickelide based alloy with various diameters (less than 100 microns) using laser welding. The comparative analysis of the obtained results with the further perspective use of laser welding in the manufacture of mesh metal structures is carried out.

Сплавы на основе никелида титана являются функциональными материалами, проявляющими широкий спектр различных свойств: память формы, сверхэластичность и т.д. Из сплавов на основе TiNi марки ТН-10 производят проволоку размером менее 100 мкм со сверхэластичными

свойствами, которая широко используется при производстве имплантационного шовного материала, металло-трикотажа и других реконструктивных систем. Проволока представляет собой композиционный материал, состоящий из сердцевины – сплава TiNi и поверхностного оксидного слоя, физико-механические свойства которых отличаются друг от друга [1]. С уменьшением толщины проволоки происходит увеличение влияние оксидного слоя на физико-механические свойства, что связано с ростом объемной доли оксидного слоя. Во многих случаях практического применения (рис. 1а) проволоки  $d$  менее 100 мкм возникает необходимость проводить ее сварные соединения. Использование метода лазерной сварки обусловлено особенностями взаимодействия лазерных лучей со сплавами (локальный характер теплового воздействия, минимальная термическая деформация, широкий диапазон регулирования энергетических характеристик лазерного луча, высокие скорости нагрева и охлаждения) [2].

В работе использовали проволочные образцы сплавов марки ТН-10 толщиной 100 и 60 мкм. Лазерную сварку проводили при помощи иттербиевого волоконного лазера ЛК-100-В с мощностью луча в пределах от 10 до 40 Вт. Скорость движения пятна лазера варьировалась в пределах от 10 до 40, мм/с. Диаметр пятна лазерного излучения  $d_{л.л.} = 200$  мкм.

В результате расплавленный металл из проволоки в области сварного соединения образует шарики близкие по форме к сферическому (рис. 1 б, в). Для проволоки  $d=60$  мкм диаметр сварного шарика достигает значений 180 мкм, при  $d=100$  мкм, сварной шарик имеет диаметр около 200 мкм.

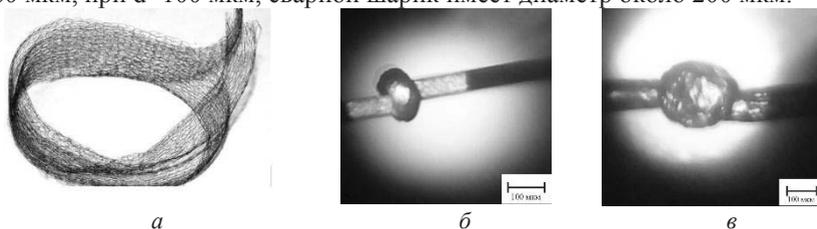


Рис. 1. Никелид титановая проволока: а – общий вид вязаного материала; б – внешний вид сварного соединения проволоки  $d$  60 мкм; в –  $d$  100 мкм

Вследствие высокой эффективности энергозложения при воздействии лазерного луча при сварке проволоки ТН-10 менее 100 мкм образуется сварочный шарик, который и обеспечивает сварное соединение. Быстрое охлаждение расплава приводит к образованию специфического по структуре и составу состояния в сварном шарике и в зонах термического влияния.

*Список литературы*

- [1] А.Г. Григорьянц, Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология. Лазерная сварка металлов. Т.5 М.: Высшая школа. 1988. 207 с.
- [2] В.Э. Гюнтер, Е.С. Марченко, С.В. Гюнтер, Г.А. Байгонакова. Влияние поверхностного слоя на комплекс свойств тонкой проволоки из сплава на основе TiNi // Письма в ЖТФ, 2018, том 44, вып. 18. С. 10-16.

Д.В. ПАНОВ, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ,  
Э.Д. ИШКНЯЕВ, К.Л. СЕРГЕЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **СОЗДАНИЕ ГИДРОФОБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАЛИ ЛАЗЕРОМ С НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСА**

В работе рассмотрен способ создания гидрофобных покрытий лазером с наносекундной длительностью импульса. Определены зависимости краевого угла смачивания от различных характеристик лазерного излучения и сканирующей системы. Рассмотрено влияние различных стратегий обработки на величину краевого угла.

D.V. PANOV, A.S. SCHEKIN, V.N. PETROVSKY, E.D.  
ISHKINYAEV, K.L. SERGEEV

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

## **CREATING OF HYDROPHOBIC SURFACES ON STAIN- LESS STEEL WITH NANOSECOND LASER**

The way of creating hydrophobic coatings with a nanosecond laser is considered. The dependences between the contact angle and different parameters of the laser radiation and scanning system are determined. The efficiency of the different scanning strategies was considered.

Создание гидрофобных и супер-гидрофобных поверхностей на металле вызывает широкий интерес как метод защиты металлических поверхностей от агрессивных сред, коррозии. В недавних работах рассматривается метод создания гидрофобных поверхностей с помощью ультракоротких лазерных импульсов [1]. Такой подход может иметь ограниченное применение в промышленности из-за высокой стоимости и сложности установок с источниками ультракоротких импульсов. В настоящей работе рассмотрено применение широко распространённых наносекундных источников излучения для создания гидрофобных поверхностей.

Главным параметром для измерения гидрофобности является краевой угол смачивания. Краевой угол смачивания  $\theta$  - угол, который образуется между касательной, проведённой к поверхности фазы жидкость-газ и твёрдой поверхностью с вершиной, располагающейся в точке контакта

трёх фаз, и условно измеряемый всегда внутрь жидкой фазы. Гидрофобные поверхности определяются как поверхности с краевым углом  $\theta$  превышающим  $120^\circ$ .

Появление гидрофобных свойств при лазерной обработке связано с появлением “эффекта лотоса”. При лазерной обработке на поверхности металла появляется не только химическое покрытие, но также и микроструктура, которая также увеличивает угол смачивания [2].

В результате исследования, были получены зависимости краевого угла смачивания от различных параметров лазерного излучения и сканирующей системы. По полученным зависимостям определены оптимальные параметры излучения и сканирующей системы для создания гидрофобных покрытий с наибольшим углом смачивания. Пример гидрофобного покрытия приведен на рисунке 1.

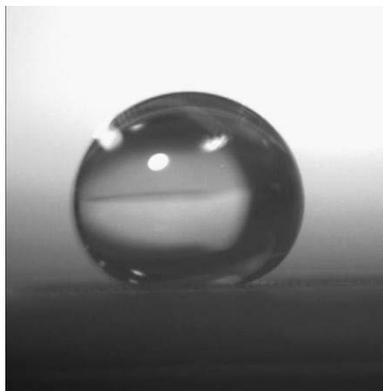


Рисунок 1- Пример полученной супергидрофобной поверхности

Получены поверхности контактным углом смачивания свыше  $150^\circ$ , такие поверхности можно отнести с супергидрофобным.

*Список литературы*

- [1] A. Y. Vorobyeva, Chunlei Guob, «Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses», Journal of Applied Physics 2015 117:3.

Д.В. СИМАНОВСКИЙ, Т.И. ОВСЕЦИНА,  
П.В. АНДРЕЕВ, А.Л. МУРГИН, А.Е. ЕГОРОВА,  
В.А. ИВАНОВ

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия*

## ПОЛУЧЕНИЕ И ПАРАМЕТРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{GeO}_4)_3$

Были выращены монокристаллы нового соединения  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{GeO}_4)_3$ , обнаруженного при исследовании фазовых диаграмм  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{MoO}_3\text{--CaO--GeO}_2$  [1,2], и определены основные структурные параметры данных кристаллов.

D.V.SIMANOVSKY, T.I.OVSETSINA, P.V. ANDREEV,  
A.L.MURGIN, A.E. EGOROVA, V.A.IVANOV

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

## THE SYNTHESIS AND PROPERTIES OF $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{GeO}_4)_3$ SINGLE CRYSTALS

Single crystals of a new compound  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$  were grown. This compound was found from the phase diagram  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{MoO}_3\text{--CaO--GeO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ [1,2]. The main structural parameters of this compound were obtained.

Монокристаллы выращивались из раствора в расплаве (flux-метод) методом спонтанной кристаллизации. В качестве состава шихты для выращивания был выбран состав 0,74 масс %  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{MoO}_3$ , 0,17 масс %  $\text{GeO}_2$  и 0,09 масс %  $\text{CaO}$  (см. фазовую диаграмму псевдотройной системы  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{MoO}_3\text{--CaO--GeO}_2$  в [2]). К указанному составу добавлялся  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в количестве 0,25% от суммы масс  $\text{Li}_2\text{O}$  и  $\text{MoO}_3$ . Раствор гомогенизировался при температуре 1140°C в течение 1 ч. Выращивание, производилось при режиме снижения температуры со скоростью 0,1 – 0,2 °C/час в течении 6 суток. Температура начала кристаллизации определялась экспериментально и находилась в диапазоне 1070 – 1080°C.

В результате выращивания были получены монокристаллы изумрудно-зеленого цвета линейными размерами не превышующими 2 мм.

В результате рентгеноструктурного анализа были получены основные параметры исследуемого кристалла (таблица 1). Уточнена структурная формула соединения –  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{GeO}_4)_3$ .

Структура соединения кристалла  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{GeO}_4)_3$  типична для группы соединений гранатов [3], имеет каркасный характер. Атом Cr координирует 6 атомов O, формируя октаэдр, близкий к правильному. Средняя длина ребра октаэдра составляет 2.452 Å. Координация атома Ge представляет собой тетраэдр с расстояниями 2.732 и 2.954 Å. Средняя длина ребра тетраэдра – 2.843 Å.

По итогам проведенного рентгеноструктурного исследования соединение  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{GeO}_4)_3$  было депонировано в Банке данных неорганических структур ICSD. Присвоенный номер депонента CSD №433178.

Таблица 1. Параметры кристалла новой германатной фазы

Пространственная группа	$Ia\bar{3}d$
a, Å	12.2641(1)
Объем элементарной ячейки V,	1844.6(2)
Плотность кристалла, г/см <sup>3</sup>	4.566
Число измеренных рефлексов	13858
Число независимых рефлексов	378
R <sub>int</sub>	3.63 %
Число формульных единиц Z	8

#### Список литературы

- [1] V.A.Ivanov, M.O.Marychev, P.V.Andreev, I.Koseva, P.Tzvetkov, V.Nikolov. Novel solvents for the single crystal growth of germanate phases by the flux method - Journal of Crystal Growth 426 (2015) 25–32.
- [2] V.A. Ivanov, M.O. Marychev, P.V. Andreev, V.A. Lykov, M.A. Faddeev, I.Koseva, V.Nikolov.  $\text{Ca}_{2-x}\text{Li}_{2x}\text{GeO}_4$  solid solutions. Chemical composition range and fluxcrystal growth - Materials Chemistry and Physics 167 (2015) 56-60.
- [3] G. A. Novak, G. V. Gibbs. The Crystal Chemistry of The Silicate Garnets. - The American Mineralogist, vol. 56, may-june, 1971.

Д.И. ГАВРИЛОВ<sup>1</sup>, А.Ю. МАРЧЕНКОВ<sup>1</sup>, А.Б. ЛЮХТЕР<sup>2</sup>,  
К.В. СКВОРЦОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и  
Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия*

## **АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ БЕЗОБРАЗЦОВОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ**

Применение безобразцового метода контроля, основанного на вдавлении индентора, позволило выявить распределение механических свойств в различных зонах сварного соединения. Исследованы разнородные сварные соединения сталей 18ХГ с 25ХГСА, полученные лазерной сваркой.

D.I. GAVRILOV<sup>1</sup>, A.Y. MARCHENKOV<sup>1</sup>, A.B. LYUKHTER<sup>2</sup>,  
K.V. SKVORTSOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)*

<sup>2</sup>*Vladimir State University Named After Alexander and Nikolay Stoletovs*

## **APPROBATION OF THE SAMPLE-FREE MECHANICAL PROPERTIES DIAGNOSTICS OF WELDED JOINTS OF DISSIMILAR STEELS**

The use of a sample-free diagnostics method based on indentation made it possible to reveal the distribution of mechanical properties in weld joint zones. The dissimilar weld joints of 5120 with 25HGS steels obtained by laser welding were investigated.

Сварные соединения легированных высокопрочных сталей перлитного класса широко применяются в машиностроении и других отраслях промышленности для изготовления ответственных сварных конструкций, работающих в условиях высоких статических нагрузок. Такие конструкции требуют повышенного внимания при разработке технологии сварки в связи с их склонностью к образованию трещин из-за формирования в процессе сварки метастабильных закалочных структур, обладающих пониженной пластичностью [1]. Использование лазерной сварки, обеспечивающей высокую концентрацию плотности мощности в зоне обработки, позволяет уменьшить вероятность образования трещин в сварном соединении за счет минимизации размеров шва и зоны термического влияния. Кроме того, лазерную сварку зачастую применяют для обработки изделий

малых габаритов, из которых затруднительно или невозможно изготовить стандартные образцы для механических испытаний на разрыв. В связи с этим, задача разработки технологии определения механических свойств сварных соединений, полученных лазерной сваркой, безобразцовым способом является в настоящее время актуальной. Применение такой технологии может являться заменой классического испытания на разрыв.

Авторским коллективом была опробована методика безобразцовой оценки механических свойств вдавливанием индентора [2] на образцах сварных соединений, полученных излучением иттербиевого волоконного лазера. Метод основан на аналогии диаграмм растяжения образцов и вдавливания индентора, что позволяет получить распределение характеристик прочности (предела текучести и временного сопротивления) по сечению соединения с выявлением наиболее слабого места (рис. 1а).

В настоящей работе исследовались сварные соединения сталей 18ХГ с 25ХГСА, полученные лазерной сваркой в среде защитных газов. Метод безобразцовой оценки механических свойств применялся на этапе отработки технологии сварки и позволил подтвердить оптимальный режим сварки, обеспечивающий получение равнопрочных сварных соединений, разрушающихся при испытаниях растяжением образцов происходит по основному металлу (коэффициент прочности шва  $k > 1$ ) (рис. 1б).

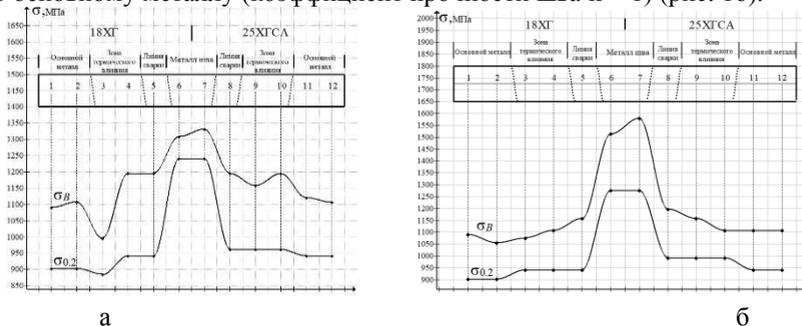


Рис. 1. Распределение предела текучести  $\sigma_{0.2}$  и временного сопротивления  $\sigma_B$  в поперечном сечении сварных соединений сталей 18ХГ и 25ХГСА.

#### Список литературы

- [1] Драгунов В.К. и др. Разработка технологии электронно-лучевой сварки сосудов высокого давления из стали 30ХГСА // Нефтяное хозяйство. 2016. №12. С. 126-130.
- [2] Матюнин В.М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 288 с.

Б.А. ДЕМИДОВ<sup>1</sup>, Е.Д. КАЗАКОВ<sup>1,2</sup>, Ю.Г. КАЛИНИН<sup>1</sup>, Д.И.  
КРУТИКОВ<sup>1</sup>, А.А. КУРИЛО<sup>1</sup>, М.Г. СТРИЖАКОВ<sup>1</sup>,  
А.Ю. ШАШКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>НИУ «МЭИ», Москва, Россия

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

На сильноточном ускорителе электронов «Кальмар» разработана схема лазерного зондирования с регистрацией теневых изображений электронно-оптической камерой, работающей в хронографическом режиме. Особенности выбранного для зондирования лазера, оптической схемы и регистратора обеспечивают её универсальность - она может применяться как для исследования ударно-волновых процессов в прозрачных мишенях, так и для изучения плазменных процессов в диодном зазоре.

B.A. DEMIDOV<sup>1</sup>, E.D. KAZAKOV<sup>1,2</sup>, Yu.G. KALININ<sup>1</sup>,  
D.I. KRUTIKOV<sup>1</sup>, A.A. KURILO<sup>1</sup>, M.G. STRIZHAKOV<sup>1</sup>,  
A.Yu. SHASHKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRU "MPEI"

## **APPLICATION OF LASER PROBING FOR IP- INVESTIGATION OF PLASMA PROCESSES AND DISTRIBUTION OF SHOCK WAVES IN TRANSPARENT MATERIALS**

At Calamary high-current electron accelerator, a shadow diagnostics was developed. The features of selected laser, optical scheme and detector provide its multi-operated. Diagnostics can be used to study shock-wave processes in transparent targets, as well as to study plasma processes in a diode gap.

При исследовании взаимодействия сильноточных электронных пучков с конденсированными мишенями важной задачей является визуализация происходящих процессов. С одной стороны необходимо иметь информацию о динамике плазмы, вылетающей с поверхности анода при его абля-

ции, с другой, по возможности, иметь информацию о ходе распространения ударной волны в облучаемом образце. Как было показано в работе [1], для исследования динамики плазмы не достаточно регистрировать её собственное свечение в связи с тем, что из-за большой оптической толщины излучение основной массы плазмы перепоглощается. В связи с этим для исследования динамики диодной плазмы была разработана схема лазерного зондирования (рис. 1), которая позволяет определять пространственно-временные характеристики плазмы, в первую очередь её концентрацию, как по поглощению лазерного излучения, так и по визуализации областей с градиентами показателя преломления зондируемого объекта. Эта же схема может быть использована для визуализации процессов распространения ударных волн, возбуждаемых электронным пучком, в прозрачных образцах, расположенных на аноде.

Для того, чтобы диагностика была достаточно универсальной (характерные времена плазменных и ударно-волновых процессов отличаются на порядок), для зондирования применялся твердотельный лазер с активным элементом из ортоалюмината иттрия с неодимом [2]. Излучение второй гармоники, сгенерированной в кристалле титанил-фосфата калия, размещенного внутри резонатора, имеет следующие параметры: длина волны 540 нм, длительность импульса по основанию 200 мкс при высоком уровне однородности и острых фронтах, энергия импульса 100 мДж, расходимость 6 мрад, диаметр пучка 6мм. В качестве регистратора применялась электронно-оптическая камера, работающая в режиме щелевой развертки с длительностями от 0,005 до 75 мкс. Пример теневого изображения разлета диодной плазмы. Шаг сетки по вертикали 1 мм, по горизонтали 20 нс. Первые результаты исследований распространению ударной волны приведены в работе [3].

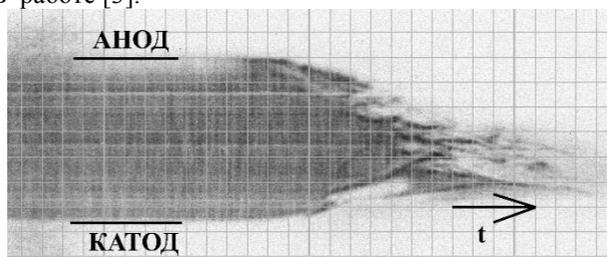


Рис.2.Теневое изображение разлетающейся диодной плазмы.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 06.07.2018 № 1615).

*Список литературы*

- [1] Ананьев С.С., Багдасаров Г.А. и др.// Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 7. С. 608-615.
- [2] Е.И.Агеенков, В.А.Коновалов и др. Электронная техника, Сер. Лазерная техника и опто-электроника. 1998, вып.2, стр.58-63.
- [3] Демидов Б. А., Казаков Е. Д. и др.//Прикладная физика. 2018. № 6. С. 74.

Е.Ю. ЗАРУБИНА, Е.Ю. СОЛОМАТИНА, В.М. ИЗГОРОДИН,  
Е.И. ОСЕТРОВ, А.П. ПЕПЕЛЯЕВ  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г.Саров

## **ДИАГНОСТИКА КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ПО ТЕНЕВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

Проведено построение теоретической модели прохождения света через оболочку с топливом в двух различных приближениях для определения параметров (толщины, разнотолщинности и локальной толщины) криогенного слоя изотопов водорода в оптически прозрачной оболочке-капсуле. Криогенная мишень необходима для исследований ЛТС на установке мегаджоульного уровня энергии.

E.Y. ZARUBINA, E.Y. SOLOMATINA, V.M. IZGORODIN,  
E.I. OSETRV, A.P. PEPELYAEV  
*Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental  
Physics (RFNC-VNIIEF), Sarov*

## **CHARACTERIZATION OF HYDROGEN ISOTOPES CRYOGENIC LAYER IN SPHERICAL CAPSULE ACCORDING TO SHADOW IMAGES**

Theoretical simulation of light propagation through a shell with fuel was carried out in two different approaches for characterization (thickness, polythickness and local thickness determination) of hydrogen isotopes cryogenic layer in optically transparent capsule. Cryogenic target is necessary for laser-driven fusion researches on a megajoule energy level facility.

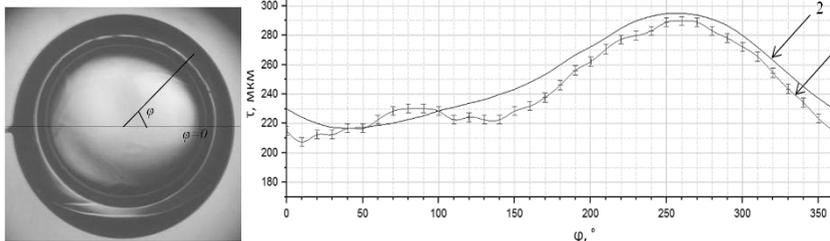
Измерение параметров криослоя основано на определении положения характеристического «яркого кольца» относительно края оболочки на теневом изображении [1]. Поэтому проведено построение теоретической модели прохождения света через оболочку с топливом для измерения параметров криогенного слоя изотопов водорода в оптически прозрачной оболочке-капсуле, выполнена ее экспериментальная проверка. Измерение толщины криослоя можно проводить в двух различных приближениях.

В первом приближении считается, что локально внутренняя поверхность криослоя и яркое кольцо имеют сферическую форму, с определенным шагом по углу  $\varphi$  измеряется локальный радиус яркого кольца и ему в соответствие ставится локальная толщина криослоя. Получены зависимо-

сти нормированного (на радиус оболочки) радиуса яркого кольца от нормированной однородной толщины криогенного слоя для нескольких значений нормированной толщины оболочки. Выполнена экспериментальная проверка теоретической модели.

Во втором приближении проведено прямое трехмерное моделирование положения и формы характеристического яркого кольца на теневом изображении в зависимости от параметров оболочки и криогенного топлива с ненулевой разнотолщинностью. На основании моделирования написана программа в пакете для математических вычислений “MathCAD”, в которой для оболочки с отвердевшим слоем дейтерия (диаметр оболочки 1820 мкм, толщина стенки <10 мкм), как показано на рисунке 1,а, проведено моделирование положения и формы яркого кольца. На рисунке 1,б приведен полученный график толщины криослоя в [мкм] (кривая под номером 2) при максимальном совпадении теоретически смоделированных и экспериментально измеренных по фотографии параметров яркого кольца.

На рисунке 1,б также представлен график локальной толщины криослоя (кривая под номером 1), полученный в первом приближении.



а)

б)

$\tau$  – толщина криослоя;  $\varphi$  – полярный угол

Рис.1 – а) Теневое изображение оболочки с твердым криослоем, б) график локальной толщины криослоя, полученный в 1-м (кривая 1) и во 2-м (кривая 2) приближениях

Разнотолщинность криослоя в плоскости изображения составляет  $\Delta=(17\pm 2)\%$  при его средней толщине  $(245\pm 3)$  мкм. Видно, что форма кривых 1 и 2 на графике 1,б повторяется, что свидетельствует о возможности применения описанных приближений для определения толщины криогенного слоя.

#### Список литературы

- [1] Cryogenic Target Handling System Operations Manual, Volume IV-CTHS Description, Chapter 8: Characterization Station (CS), Revision A – May, 2004. C.14

А.А.ГОРДЕЕВ, В.Ф.ЕФИМКОВ, И.Г.ЗУБАРЕВ, С.И.МИХАЙЛОВ  
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва*

## **НАБЛЮДЕНИЕ ВЫНУЖДЕННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА СО СРЕДОЙ**

Экспериментально исследовано вынужденное температурное рассеяние света коротких лазерных импульсов различной длительности. Показано, что наблюдаемый anomalously большой антистоксов спектральный сдвиг ( $\Omega \gg 1/(2\pi t)$ , где  $t$  – время релаксации температурной решетки) в отраженном сигнале зависит от длительности импульса накачки.

A.A.GORDEEV, V.F.EFIMKOV, I.G.ZUBAREV, S.I.MIKHAILOV  
*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

## **OBSERVATION OF STIMULATED THERMAL SCATTERING OF LIGHT UPON NONSTEADY-STATE INTERACTION BETWEEN A LASER PULSE AND A MEDIUM**

The induced thermal scattering of light has been experimentally investigated for short laser pulses of different durations. It is shown that the observed anomalously large anti-Stokes shift ( $\Omega \gg 1/(2\pi t)$ , where  $t$  is the thermal grating relaxation time) in the reflected signal depends on the pump pulse duration.

Нестационарное взаимодействие импульса со средой имеет место тогда, когда длительность импульса оказывается сравнимой со временем релаксации записанной им в среде температурной решетки  $t = 1/(\chi q^2)$ , где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности среды, а  $q$  – волновой вектор решетки. В последнее время появилась серия работ [1–3], авторы которых утверждают, что они наблюдали новый вид вынужденного рассеяния света, названный вынужденным рассеянием Ми (ВРМ). Условия, при которых авторы наблюдали это рассеяние, совпадают с обычными условиями наблюдения вынужденного температурного рассеяния света (ВТР). По наблюдениям авторов спектр рассеянного излучения воспроизводит спектр накачки. В работе [4] мы наблюдали ВТР лазерного излучения с

аномально большим антистоксовым частотным сдвигом рассеянной компоненты. Цель данной работы выяснить физическую причину подобного явления. В работе [5] авторы в стационарном режиме прописали контур линии усиления, обусловленной акустическими и температурными флуктуациями среды. Они получили хорошее согласие со стационарной теорией, т.е. что максимальное усиление внешнего сигнала при процессе вынужденного температурного рассеяния реализуется на антистоксовой частоте  $\Omega = 1/t = \chi q^2$ . Существенное отличие условий нашего эксперимента в работе [4] от работы [5] состоит в том, что длительность нашего лазерного импульса сравнима со временем релаксации соответствующей температурной решётки  $t=1/\chi q^2$  для использованного нами вещества толуола. В нашем случае ВТР света происходит в нестационарном режиме, а контур усиления несимметричен по спектру и имеет вид дисперсионной кривой. В этом, по нашему мнению, физическая причина наблюдаемого нами аномального сдвига частоты рассеянной компоненты при ВТР излучения коротких импульсов. Для этого мы измерили частотный сдвиг рассеянной компоненты при ВТР света лазерных импульсов различной длительности. В экспериментах использовался толуол, в котором при двухфотонном поглощении накачки второй гармоникой неодимового лазера  $\lambda=532$  нм наблюдалось ВТР. Длина кюветы—6 см, фокусирующая линза—3 см, длительность импульса накачки—30 нсек, короткого прямоугольного импульса—10 нсек. На рис.1 представлены измеренные методом двойного поля в эталоне Фабри-Перо с базой 9 см спектры накачки и отраженного излучения: слева ВТР-сдвиг~50 МГц для длительности импульса накачки 30 нсек, справа – ВТР-сдвиг~100 МГц для импульса 10 нсек. Эти значения значительно превосходят  $1/(2\pi t) = 16$  МГц в работах [1–3].

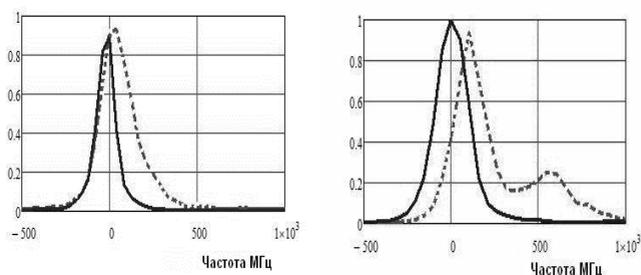


Рис.1. Спектры: накачка – сплошная кривая, отраженное излучение – пунктир.

#### Список литературы

- [1] He G., Yong K., Zhu J., Prasad P.N. *Phys. Rev. A*, 85, 043839, (2012).  
 [2] He G.S., Law W., Liu L., Zhang X., Prasad P.N. *Appl. Phys. Lett.*, 101, 011110 (2012).

- [3] He G.S., Law W., Baev A., Liu S., Swihart M.T. et al. *J. Chem. Phys.*, 138, 024202 (2013).
- [4] A.S.Averyushkin, N.A.Bulychev, V.F.Efimov, A.I.Erokhin, S.I.Mikhailov, I.N.Saraeva, I.G.Zubarev, “Stimulated scattering in Ag nanoparticle colloid”, *Laser Physics*, 27, 055401, (2017).
- [5] G.W.Faris, M.Gerken, C.Jirascsek, DaN.Hogan, Y.Chen, “High - spectral - resolution stimulated Rayleigh – Brillouin scattering at 1  $\mu\text{m}$ ”, *Opt.Lett.*, 26, N23, p.1894, 2001.

**И.С. ПЕЧНИКОВ, А.Б. ЛЮХТЕР, А.Н. ГОЦ**

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых  
(ВлГУ), Владимир, Россия*

## **ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА ДВС ИЗЛУЧЕНИЕМ ИТТЕРБИЕВОГО ВОЛО- КОННОГО ЛАЗЕРА**

В большинстве двигателей, эксплуатирующихся в обычных условиях, максимальный износ на внутренней поверхности гильзы цилиндра происходит в месте остановки первого компрессионного кольца при положении поршня в ВМТ. Это результат абразивного изнашивания в условиях полужидкостного трения и высоких температур, что снижает не только надежность двигателя, но и его эффективность. В докладе предлагается способ термоупрочнения внутренней поверхности цилиндра излучением иттербиевого волоконного лазера по определенной схеме. В ходе исследования были измерены шероховатость поверхности после термообработки, проведены металлографические исследования и механические испытания на износостойкость.

**I.S. PECHNIKOV A.B. LYUKHTER A.N. GOTS**

*Vladimir state university named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimír, Russia*

## **HARDENING OF THE INTERNAL SURFACE OF THE CYLINDER OF THE ENGINE OF INTERNAL COMBUSTION BY RADIATION OF THE YTTERBIUM FIBER LASER**

In most engines operating under normal conditions, the maximum wear on the inner surface of the cylinder liner occurs at the point where the first compression ring stops when the piston is in the TDC. This is the result of abrasive wear in conditions of semi-fluid friction and high temperatures, which reduces not only the reliability of the engine, but also its efficiency. The report proposes a method of thermal hardening of the inner surface of a cylinder by radiation of an ytterbium fiber laser according to a specific scheme. In the course of the study, the surface roughness after heat treatment was measured, metallographic studies and mechanical wear resistance tests were carried out.

Надежность и долговечность тепловой машины оценивают по стабильности рабочих характеристик, заложенных в ней при изготовлении. В двигателях наиболее быстро изнашиваются поршневые кольца, поршни, цилиндры, клапаны, коленчатый вал, шатунные и коренные шейки коленчатого вала [1].

В цилиндре двигателя процесс механического изнашивания наиболее вероятен в верхней его части, где в отдельных точках возникает схватывание поверхностей трущихся пар [2]. Интенсивность механического изнашивания зависит от скоростей перемещения трущихся поверхностей, температуры и давлений. При их неблагоприятном сочетании интенсивность схватывания резко увеличивается и может возникнуть задир [2]. Устранить износ внутренней поверхности цилиндра можно с помощью механического растачивания, хонингования, шлифования, наплавки, установки высокопрочных вставок, а также лазерной обработкой [3].

В докладе представлены результаты лазерного термоупрочнения (ЛТУ). Исследование технологии ЛТУ излучением иттербиевого волоконного лазера выполнялась на лазерном роботизированном комплексе ЛРК-5 НОЦ ВЛТ ВлГУ.

Была исследована структура и проведены испытания твердости обработанной поверхности на металлографических шлифах, проведены испытания на шероховатость и износостойкость.

Ширина дорожек, полученных ЛТУ составляет 3 мм. Оптимальный угол перекрещивания дорожек – 60 градусов (Рис.1). Результаты исследований будут предоставлены в докладе.

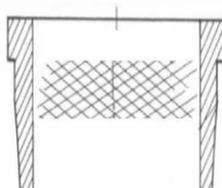


Рис 1. Гильза цилиндра со схемой наносимой сетки

Технология ЛТУ верхней зоны цилиндра позволяет сформировать условия для снижения износа и увеличить ресурс теплового двигателя.

#### *Список литературы*

- [1] Разработка и исследование автоматизированного устройства для лазерного термоупрочнения гильз цилиндров на базе двигателей с полым ротором // <https://mobile.studbooks.net/2523916/tovarovvedenie> // 113 стр.
- [2] Износ и долговечность автомобильных двигателей [Текст] / М. А. Григорьев, Н. Н. Пономарев. - Москва : Машиностроение, 1976. - 248 с.
- [3] Захаров, Ю. А. Устройство для восстановления внутренних цилиндрических поверхностей деталей мобильной техники гальваномеханическим осаждением покрытий [Электронный ресурс] / Ю. А. Захаров, И. А. Спицын, Г. А. Мусатов // Инженерный вестник Дона: электронный научный журнал. № 1, 2015.

А.В. ИВАЩЕНКО, Д.А. КОЧУЕВ, А.Ф. ГАЛКИН, К.С. ХОРЬКОВ,  
М.А. ТАРАСОВА

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Россия*

## **ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕННОМ КАНАЛЕ, ИНДУЦИРОВАННОМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Представлены результаты математической оценки концентрации свободных электронов в плазменном канале. В качестве источника плазменного канала была использована фемтосекундная лазерная система. Собрана экспериментальная схема для определения времени жизни плазменного канала. Проведен расчет по двум способам для оценки концентрации свободных электронов в плазме, индуцированной фемтосекундным лазерным излучением.

A.V. IVASHCHENKO, D.A. KOCHUEV, A.F. GALKIN,  
K.S. KHORKOV, M.A. TARASOVA

*Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs, Vladimir, Russia*

## **ESTIMATION OF CONCENTRATION OF FREE ELECTRONS IN A PLASMA CHANNEL INDUCED BY FEMTOSECOND LASER RADIATION**

The results of mathematical evaluation of the concentration of free electrons in the plasma channel are presented. Femtosecond laser system was used as a source of plasma channel. An experimental scheme for determining the lifetime of the plasma channel is assembled. Two methods were used to estimate the concentration of free electrons in plasma induced by femtosecond laser radiation.

В настоящее время исследование характеристик, а так же параметров, при которых образуются плазменные каналы, представляет собой большой интерес [1-3]. Лазерная плазма нашла широкое применение в различных сферах за счет высокой проводимости, так в работе [4] проводящие лазерные плазменные каналы были использованы в качестве электродов инструментов для электроэрозионной обработки материалов.

В работе была проведена математическая оценка концентрации электронов в плазменном канале в среде атмосферного воздуха при нормальных условиях. Плазменный канал был создан при помощи фемтосекунд-

ной лазерной системы со следующими параметрами: энергия в импульсе – 150 мкДж, длительность импульса – 280 фс. Для получения оценки свободных электронов необходимо было так же получить значение времени жизни плазменного канала. Для этого был проведен эксперимент с использованием схемы, используемой в работе [5]. Лазерно-индуцированный плазменный канал диагностировался с помощью зондирующего лазерного импульса, который проходил через линию оптической задержки, затем попадал в область плазменного канала и просвечивал ее. С помощью регулирования длины линии задержки возможно изменять момент прихода зондирующего импульса в область плазменного канала, и изучать временную динамику лазерной плазмы. Таким образом, было получено примерное время жизни лазерно-индуцированного плазменного канала, которое составляло 10 нс.

Для оценки, условия существования плазменного канала считались равновесными. Оценка производилась двумя способами. В первом способе концентрация была рассчитана через величину проводимости, где напряженность пробоя на оптических частотах по литературным данным [6] составляла  $10^8$ - $10^9$  В/м. Таким образом, оценочная концентрация свободных электронов в плазме составляла  $4,3 \cdot 10^{12}$  1/см<sup>3</sup>. Вторым способом концентрация была оценена через характерное время тройной рекомбинации. Оценочная величина концентрации свободных электронов в лазерно-индуцированном плазменном канале, полученном при помощи фемтосекундного излучения,  $10^{13}$  1/см<sup>3</sup>, что хорошо согласуется с расчетами по первому способу.

#### *Список литературы*

- [1] И. Ю. Скобелев, А. Я. Фаенов, С. В. Гасилов, Т. А. Пикуз. Диагностика плазмы, создаваемой при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на мишени с внутренней наноструктурой//Прикладная физика. – № 3. –2009. –С. 58-67.
- [2] А. Н. Чумаков, В. Б. Авраменко, Н. А. Босак. Плазмообразование при высокочастотном импульсно-периодическом лазерном воздействии на металлы в воздухе при пониженном и атмосферном давлениях//Журнал прикладной спектроскопии. – Т.79. – 2012. – С.279-287.
- [3] И.И. Артеменко, А.А. Голованов, И.Ю. Костюков и др. Образование и динамика плазмы в сверхсильных лазерных полях с учетом радиационных и квантово-электродинамических эффектов//Письма в ЖЭТФ. – Т.104. – Вып. 12. –2016. – С. 892-902.
- [4] Д.В. Козырь. Применение плазменного канала оптического пробоя в качестве катода в электроэрозионной обработке//Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11.–2013. – С.141-146.
- [5] В.В. Букин, С.В. Гарнов и др. Интерферометрическая диагностика фемтосекундной лазерной микроплазмы в газах//Труды института общей физики им. А.М. Прохорова.- Т.67.-2011.-с.3-31.

[6] Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов//М.: Наука, Физматлит.- 1980.-416с.

К.Л. СЕРГЕЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ,  
Э.Д. ИШКИНЯЕВ, А.С. ЩЕКИН, Д. В. ПАНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ  
ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА МОДИФИКАЦИЮ  
ИЗНОСОСТОЙКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ХРОМА,  
ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО  
НАПЫЛЕНИЯ**

В работе были проведены исследования по обработке поверхностей, содержащих в своей основе Cr, лазерным излучением. Полученные образцы проходили механические испытания на микротвердость при различных параметрах лазерного излучения. Результаты исследования показали, что наибольший вклад в регулировании параметра микротвердости излучения вносит изменение параметра скорости сканирования обрабатываемой поверхности. Обнаружено, что лазерная обработка поверхностей, содержащих Cr, приводит к укреплению поверхности материала.

K.L. SERGEEV, V.N. PETROVSKIY,  
E.D. ISHKINYAEV, A.S. SCHEKIN, D.V. PANOV

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

**RESEARCH OF THE EFFECT OF RADIATION OF A FIBER  
LASER ON MODIFICATION OF A WEAR-RESISTANT  
SURFACE ON THE BASIS OF CHROME, OBTAINED BY THE  
METHOD OF MAGNETRON DUSTING**

In this paper, studies were carried out on the treatment of surfaces, containing Cr as their basis, by laser radiation. The samples obtained were subjected to mechanical tests for microhardness with various parameters of laser radiation. The results of the study showed that the greatest contribution to the regulation of the parameter of the microhardness of the radiation is made by the change in the parameter of the scanning speed of the treated surface. It has been found that laser treatment of surfaces containing Cr leads to a strengthening of the surface of the material.

На установке МИНИМАРКЕР, оснащенной волоконным лазером мощностью до 20 Вт, производилась обработка дискообразных образцов и цилиндрических поверхностей при различных параметрах лазерного из-

лучения (менялись плотность наносимых дорожек, мощность излучения, скорость сканирования).

Испытания на микротвёрдость показали, что увеличение мощности до определенного момента приводит к росту значения исследуемого параметра, но после прохождения некоторого порога структура поверхности начинает разрушаться, что приводит к резкому уменьшению величины микротвёрдости. Наибольший вклад в изменении механических характеристик материала вносит изменение скорости сканирования образца. Это связано с тем, что при малых скоростях покрытие «перегревается», что делает его «хрупким» и образует внутри трещины. При больших скоростях сканирования удастся произвести полноценное легирование материала таким образом, чтобы не повредить само покрытие (полное отсутствие микротрещин и каких-либо дефектов). При больших скоростях обработка получается плавной и равномерной в течении всего времени проведения эксперимента. Пример результатов исследования рот мощности лазерного излучения 8 Вт приведены на рис. 1.

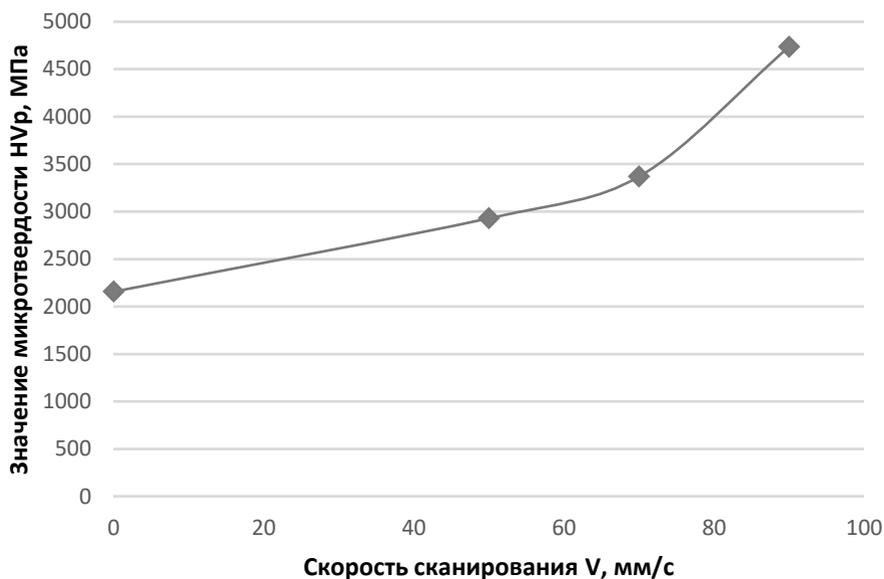


Рис. 1. График зависимости величины микротвёрдости покрытия на основе  $Sr$  от скорости сканирования лазерным излучением при мощности излучения 8 Вт.

М.И. КАЗЬМИН, Т.В. КАЗИЕВА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ**

Разработана программа для пространственно-временного усреднения спекл-картин. Получены различные распределения скоростей в одиночном и в нескольких пересекающихся капиллярах, разрешены их границы. Разработана оптическая схема для исследования капилляров микрометрового диаметра.

M.I. KAZMIN, T.V. KAZIEVA

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

## **SPECKLE INTERFEROMETRY FOR BLOOD MICROCIR- CULATION ANALYSIS**

A program has been developed for the space-time averaging of speckle-patterns. Different velocity distributions were obtained in single and in several intersecting capillaries, their boundaries were allowed. An optical scheme has been developed for the study of capillaries of micrometer diameter.

Изменение формы капилляров и скорости кровотока в капиллярах может является симптомом таких заболеваний, как сахарный диабет, атеросклероз, и др. Именно поэтому важно быстро и наиболее точно диагностировать состояние сосудов. Инвазивные методы носят локальный характер и не позволяют получить полную информацию о структуре капилляров. Существующие неинвазивные методы, основанные на скоростной фотосъемке, позволяют рассмотреть формы и распределение капилляров, но не позволяют точно определить распределение скоростей крови в них. Решить обе задачи сразу позволяет разрабатываемая система.

Принцип работы основан на регистрации и обработке спекл-картин. Образуясь при отражении когерентных волн света от шероховатой поверхности в результате рассеяния и преломления света в исследуемой среде, спекл-картины показывают интенсивность излучения в каждой точке рассматриваемого объекта.

Для регистрации спекл- картин используются камера и объектив, проводится покадровая съёмка изменения их интенсивности во времени, благодаря чему можно определить скорость элементов-отражателей, содер-

жащихся в крови, которые и будут влиять на структуру спеклов и контраст.

В настоящее время нами разработан алгоритм обработки спекл-картин, основанный на временном и пространственном усреднении полученных данных. Оно проводится для оптимизации работы программы, усреднения получаемых значений скоростей для удобства дальнейшей работы. Временное усреднение позволяет увидеть изменение состояния и положения отражателей в пространстве и, как следствие, получить контуры капилляров со значениями скоростей в каждой из точке.

Для тестирования реализованного алгоритма была собрана установка, состоящая из источника лазерного излучения (He-Ne лазер), объектива и камеры (разрешением 2048×2048 пикселей). Для симуляции капиллярной структуры использовалась стеклянная трубка с водой, в которую была добавлена металлическая стружка. Проводится покадровая съёмка спекл-картинок исследуемого предмета при передвижении воды и алюминиевой стружки в ней. Создана программа для обработки полученных данных пространственно-временным методом. С помощью нее было получено распределение скоростей микроструктур внутри капилляра (стеклянной трубки). Полученные скорости совпали с фактическими. Кроме того, был проведен эксперимент по распределению скоростей в пересекающихся капиллярах, в ходе которого также удалось получить скорости и разрешить границы капилляров.

*Список литературы*

- [1] Briers D.J., Sian Webster, "Laser Speckle Contrast Analysis(LASCA): A Nanscanning< Full-Field Technique for Monitoring Capillary Blood Flow" //Journal of biomedical optics1(2).1996., P. 174-179.

С.Ф.КОВАЛЁВА, А.С.ТИЩЕНКО, Д.О.ЗАМУРАЕВ,  
А.Л.ШАМРАЕВ, Д.С.ГАВРИЛОВ.

*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Челябинская обл., г. Снежинск*

## **ГЕНЕРАЦИЯ ПРЕДЫМПУЛЬСОВ В МНОГОПРОХОДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ**

Представлены результаты исследования генерации предымпульсов в многопроходных лазерных усилителях. Было выяснено, что источником предымпульсов является любой преломляющий оптический элемент (кристаллический АЭ), установленный в схему усилителя. Измерения отношения энергии предымпульсов к энергии основного импульса проводились при помощи быстродействующего фотодиода и абсорбционных светофильтров с известными оптическими плотностями. Сделан вывод о том, что предымпульсы выходного усилителя не превышают порог ионизации твердотельной мишени при проведении экспериментов с интенсивностью основного импульса  $\sim 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>.

S.F. KOVALEVA, A.S. TISHCHENKO, D.O. ZAMURAEV,  
A.L. SHAMRAEV, D.S. GAVRILOV

*All-Russia scientific research institute of technical physics named after academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk reg., Russia*

## **PREPULSE GENERATION IN MULTIPASS LAZER AMPLIFIERS**

We present the results of prepulse generation in multipass laser amplifiers investigation. Any refraction element inside the optical layout of the amplifier (active laser crystal) was proved to be the source of prepulses. Fast photodiode and calibrated neutral density filters were used to measure energy ratio between prepulse and main laser pulse. We conclude that prepulses generated in final amplifier do not exceed solid targets ionization threshold in laser matter interaction experiments with the main pulse intensities  $\sim 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>.

При исследованиях временного контраста выходного импульса фемтосекундной лазерной установки обнаружена сложная структура предымпульсов, опережающих основной лазерный импульс на  $\sim 5...30$  нс.

Экспериментально показано, что традиционно применяемые линейные многопроходные усилители, построенные по схеме "бабочка"(рис.1), в результате рассеяния усиливаемого лазерного излучения при прохожде-

нии через активный элемент генерируют серию предимпульсов. Количество предимпульсов зависит от числа проходов через активный элемент, а временное расстояние между предимпульсами и основным лазерным импульсом зависит от расстояния между зеркалами усилителя.

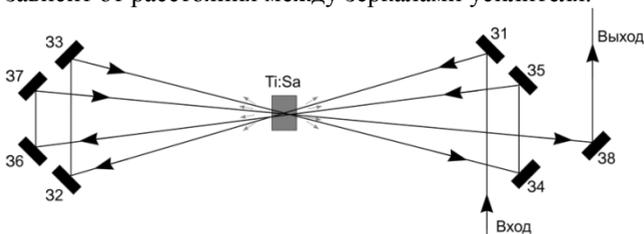


Рис. 1. Схема многопроходного усилителя.

При помощи фотодиода и набора абсорбционных светофильтров с известными оптическими плотностями проведены измерения отношения энергии предимпульсов к энергии основного импульса.

При помощи видеосистемы и набора абсорбционных светофильтров с известными оптическими плотностями проведены измерения отношения плотности энергии предимпульсов выходного усилителя к плотности энергии основного импульса при фокусировке излучения на мишень. Сделан вывод о том, что предимпульсы выходного усилителя не являются плазмообразующими и не разрушают поверхность мишени при проведении экспериментов.

#### *Список литературы*

- [1] S. Fourmaux, S. Payeur, S. Buffechoux, P. Lassonde, C. St-Pierre, F. Martin, and J. C. Kieffer, "Pedestal cleaning for high laser pulse contrast ratio with a 100 TW class laser system"// OPTICS EXPRESS Vol. 19, No. 9, 8486-8497 (2011).
- [2] S. Keppler, A. Sävert, J. Körner, M. Hornung, H. Liebetau, J. Hein, M.C. Kaluza, "The generation of amplified spontaneous emission in high-power CPA laser systems"// Laser Photonics Rev. 10, No.2, 264-277 (2016).
- [3] N.V. Didenko, A.V. Konyashchenko, A.P. Lutsenko, S.Yu. Tenyakov, "Contrast degradation in a chirped-pulse amplifier due to generation of prepulses by postpulses", // OPTICS EXPRESS, Vol. 16, No. 5, 3178-3190 (2008).
- [4] K Zeil, et al. The scaling of proton energies in ultrashort pulse laser plasma acceleration//New Journal of Physics 12 (2010) 045015.

А.В. КОЛЧИН<sup>1</sup>, Д.В. ШУЛЕЙКО<sup>1</sup>, А.В. ПАВЛИКОВ<sup>1</sup>,  
С.В. ЗАБОТНОВ<sup>1</sup>, В.А. ВОЛОДИН<sup>2,3</sup>, А.А. ПОПОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия  
<sup>2</sup>Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск,  
Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия  
<sup>4</sup>Ярославский филиал Физико-Технического института РАН имени К.А. Валиева,  
Ярославль, Россия

## **ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОТЖИГ ТОНКИХ ПЛЕНОК АМОРФНОГО ГЕРМАНИЯ И СТРУКТУР ГЕРМАНИЙ/КРЕМНИЙ**

С помощью фемтосекундных лазерных импульсов был произведен отжиг тонких пленок аморфного германия и структур германий/кремний. Спектроскопия комбинационного рассеяния света свидетельствует о кристаллизации германиевых слоев в облученных областях.

A.V. KOLCHIN<sup>1</sup>, D.V. SHULEIKO<sup>1</sup>, A.V. PAVLIKOV<sup>1</sup>,  
S.V. ZABOTNOV<sup>1</sup>, V.A. VOLODIN<sup>2,3</sup>, A.A. POPOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Yaroslavl branch of Valiev Institute of Physics and Technology, Yaroslavl, Russia

## **FEMTOSECOND LASER ANNEALING OF AMORPHOUS GERMANIUM THIN FILMS AND GERMANIUM/SILICON STRUCTURES**

Amorphous germanium thin films and germanium/silicon structures were annealed via femtosecond laser pulses. Raman spectroscopy detects crystallization of germanium layers in irradiated areas.

Сегодня детектирование и преобразование в электричество излучения ближнего инфракрасного диапазона неразрывно связано с использованием тонкопленочных структур на основе германия [1]. Одним из способов улучшения свойств таких элементов является импульсный лазерный отжиг (ИЛО), в результате которого формируются нанокристаллические области, обуславливающие эффективные поглощение света и транспорт заряда [2].

В настоящей работе были исследованы пленки аморфного германия (a-Ge) толщиной 200 нм и периодические гетероструктуры аморфный германий/аморфный кремний (a-Ge/a-Si) с толщинами слоев 10 и 5 нм, соответственно, сформированные на стеклянных подложках технологией плазмохимического осаждения. Для ИЛО был использован Cr:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> лазер (1250 нм, 0,5 мДж, 100 фс, 80 МГц). Фазовые свойства исходных и обработанных образцов были исследованы методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) при возбуждении излучением с длиной волны 632 нм.

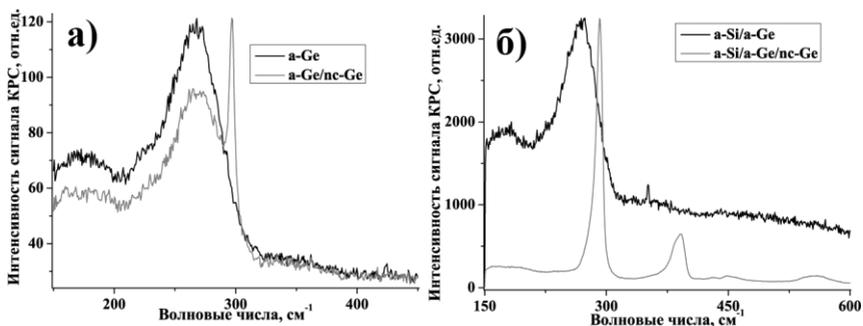


Рис.1 Спектры КРС исходных и модифицированных образцов a-Ge (а) и a-Ge/a-Si (б).

Исследование обоих типов исходных образцов методом КРС показало их аморфное строение (пик  $280\text{ см}^{-1}$  на рис. 1а,б). Спектроскопия облученных пленок a-Ge показала появление линии  $300\text{ см}^{-1}$ , свидетельствующей об образовании германиевых нанокристаллов (nc-Ge) в результате фемтосекундного ИЛО (рис. 1а). Изучение периодических гетероструктур a-Ge/a-Si показало, что в спектрах обработанных образцов наряду с полной кристаллизацией слоя a-Ge, о чем свидетельствует исчезновение пика на  $280\text{ см}^{-1}$  и появление линии на  $300\text{ см}^{-1}$ , наблюдается формирование связи Ge-Si (пик  $380\text{ см}^{-1}$  на рис. 1б).

Таким образом, комбинацией технологий плазмохимического осаждения и фемтосекундного ИЛО можно сформировать структуры на основе a-Ge с включением nc-Ge для усовершенствования их применения в фотовольтаике и оптоэлектронике.

#### Список литературы

- [1] R. Jimenez, M. Moreno, A. Torres et al. // Phys. Stat. Sol. A 2018 V. 215, № 12, P. 1-5.
- [2] O. Salihoglu, U. Kürüm, H. Yagliglu et al. // J. Appl. Phys. 2011 V. 109, № 12, P. 1-9.

Ю.В. КОЧЕТКОВ<sup>1</sup>, Ф.А. КОРНЕЕВ<sup>1</sup>, В.В. СТЕПАНИЩЕВ<sup>1</sup>,  
А.П. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, Т. ПИСАРЧУК<sup>2</sup>, М. КРУЗ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза, Варшава, Польша*

<sup>3</sup>*Институт физики плазмы Чешской Академии Наук, Прага*

## **ДИАГНОСТИКА СПОНТАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ**

Одним из наиболее интересных явлений, происходящих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, является генерация спонтанных магнитных полей. Понимание геометрии и величины таких полей крайне важно для различных приложений в лазерной физике. Диагностику спонтанных магнитных полей с высокой точностью и надежностью в определённых условиях позволяет осуществлять комплексная интерферометрия.

Y.V. KOCHETKOV<sup>1</sup>, Ph.A. KORNEEV<sup>1</sup>, V.V. STEPANISCHEV<sup>1</sup>,  
A.P. KUZNETSOV<sup>1</sup>, T. PISARCZYK<sup>2</sup>, M. KRUS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Warsaw, Poland*

<sup>3</sup>*Institute of Plasma Physics of the Czech Academy of Sciences, Prague*

## **DIAGNOSTICS OF SPONTANEOUS MAGNETIC FIELD IN LASER PLASMA**

One of the most interesting phenomena occurring during the interaction of laser radiation with matter is the generation of spontaneous magnetic fields. Knowing the geometry and magnitude of such fields is crucial for various applications in laser physics. Accurate and reliable diagnostics of these fields under certain conditions is possible using complex interferometry.

При фокусировке короткого мощного импульса лазерного излучения на поверхности плоской плотной мишени в образующейся плазме генерируется мощное магнитное поле, создаваемое быстрыми электронами и термотоками в результате лазерно-плазменного взаимодействия. Изучение данных полей важно для различных задач лазерной плазмы, поскольку они могут существенно изменить процесс генерации быстрых частиц и собственно лазерного факела. Существенным может оказаться влияние на теплопередачу, абляционное давление, скорость роста неустойчивостей,

взаимодействие плазменных потоков с другими мишенями и между собой.

Комплексная интерферометрия представляет собой развитие стандартных методов интерферометрии и поляриметрии [1]. Интерферограмма, полученная при применении данного метода, содержит в себе информацию о плотности плазмы, заключённую в интерференционной картине, и о повороте плоскости поляризации излучения в распределении интенсивности (рис.1).

Данное исследование, проведенное на установке PALS (Прага, Чехия), было направлено на измерение параметров спонтанного магнитного поля при облучении плоских мишеней. Одной из основных целей исследования является последующее определение тока быстрых электронов, определяющих разрядные токи в лазерных генераторах магнитного поля типа конденсатор-катушка. Впервые была реализована трехканальная система комплексной интерферометрии. Согласно анализу полученных данных, распределение магнитного поля соответствует тороидальному, а его максимальная величина оказывается порядка 2 МГс (рис.2). При таких полях характерное значение тока составляет несколько сотен килоампер.

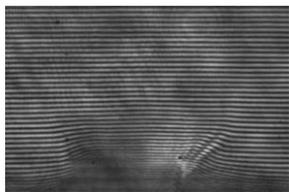


Рис.1. Фрагмент комплексной интерферограммы, полученной на установке PALS

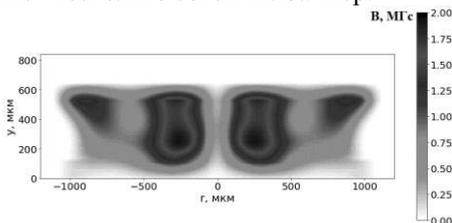


Рис.2. Магнитное поле, полученное в результате анализа интерферограммы на рис.1.

Также были проведены измерения магнитных полей в более сложных мишенях. Для получения количественных распределений магнитных полей в таких условиях планируется обобщение техники обработки комплексных интерферограмм для несимметричных распределений магнитного поля.

#### *Список литературы*

- [1] T. Pisarczyk, Yu. Gus'kov, R. Dudzak et al. Space-time resolved measurements of spontaneous magnetic fields in laser-produced plasma. *Physics of Plasmas* 22(10), 102706 (2015).

С.В. КУЗНЕЦОВ

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

## **МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ СГУСТКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЧЕРЕЗ РЕЗКУЮ ГРАНИЦУ ПЛАЗМЫ**

В одномерной геометрии исследован физический механизм процесса генерации сгустков электронов при взаимодействии лазерного импульса ультрарелятивистской интенсивности с полуограниченной плазмой, имеющей резкую границу. Показано, что генерация лазерным импульсом электронных сгустков возникает в результате многопоточного движения плазменных электронов, приводящего к пересечению их траекторий. Получено аналитическое соотношение, позволяющее оценить заряд сгустка электронов в зависимости от характеристик плазмы и параметров траекторий электронов, подтвержденное результатами численного моделирования.

S.V. KUZNETSOV

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **MECHANISM OF ELECTRON BUNCH GENERATION BY AN ULTRARELATIVISTIC-INTENSITY LASER PULSE PASSING THROUGH A SHARP PLASMA BOUNDARY**

The mechanism of the generation of electron bunches in the interaction of a laser pulse of ultrarelativistic intensity with semi-bounded plasma having a sharp boundary is studied in one-dimensional geometry. It is shown that electron bunches are generated by the laser pulse due to the multifold motion of plasma electrons with crossing trajectories. An analytical relation that allows an electron bunch charge to be estimated as a function of plasma characteristics and electron trajectory parameters is derived and confirmed by the results of numerical simulations.

Проведенное исследование генерации коротких электронных сгустков при прохождении лазерного импульса ультрарелятивистской интенсивности через резкую границу плазмы позволяет детально определить механизм, лежащий в основе данного физического явления [1,2].

Выяснено, что полный заряд электронного сгустка формируется из двух различных групп электронов. Одна группа состоит из электронов, которые в процессе своего движения не пересекают границы ионного фона, другая из электронов, которые проходят через границу ионного фона плазмы и затем возвращаются обратно. Найдено, что независимо от степени превышения полной энергии осцилляции электронов над пороговым значением, при котором становится возможным процесс генерации сгустков электронов лазерным импульсом, формирование сгустка всегда начинается с того электрона, который изначально находится на расстоянии от границы ионного фона равном амплитуде своих осцилляций, вызываемых последующим взаимодействием с лазерным импульсом.

Основной вклад в заряд сгустка, особенно при малой надпороговости процесса генерации электронного сгустка, вносят те электроны, которые в процессе своего движения не пересекают границы ионного фона. Механизм их аккумуляции в генерируемый лазерным импульсом сгусток состоит в том, что самоинжекция каждого электрона из этой группы в кильватерную волну происходит в тот момент времени и в той точке пространства, в которой в этот же момент времени находятся ранее инжектированные электроны, составляющие этот сгусток.

Электроны, которые в результате взаимодействия с лазерным импульсом вылетают за границу ионного фона, наиболее заметный вклад в заряд сгустка вносят при большой надпороговости процесса генерации электронного сгустка. Механизм их аккумуляции в генерируемый лазерным импульсом сгусток состоит в том, что эти электроны после возвращения в область ионного фона движутся со скоростями большими, чем электронный сгусток и догоняют его.

Получена формула для определения заряда сгустка на единицу его поперечного сечения, определяемая толщиной слоя невозмущенной плазмы, электроны из которого составляют электронный сгусток, генерируемый лазерным импульсом. Найдено, что аккумуляруемый в сгусток заряд полностью определяется двумя параметрами – энергией продольных осцилляций электронов и гамма-фактором кильватерной волны лазерного импульса.

#### *Список литературы*

- [1] Кузнецов С.В. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47, № 2. С. 87-96.
- [2] Кузнецов С.В. // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 10. С. 945 – 953.

С.Л. ЛЕЩЕНКО, Д.В. ПОПОВ

*Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, Красноярск, Россия*

## **МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО АВИАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ПОИСКА ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

Изложены основные результаты разработки перспективного метода дистанционного лазерного зондирования приземного слоя с целью локализации природных месторождений нефти и газа. В основу разработанного подхода положен метод обнаружения предельных концентраций природного газа в приземном слое. Метод основан на явлении резонансного поглощения лазерного излучения внутри контура спектра поглощения. Решена основная задача увеличения точности и избирательности метода, позволяющая определять предельно малые концентрации природного газа в приземном слое. Решение основано на использовании двух инфракрасных He-Ne лазеров, с разными заданными длинами волн в средневолновом спектре, оригинальных алгоритмов цифровой обработки сигнала и вариативной высоты лета летательного аппарата. Разработана адаптированная модель трассы лидара, выполнено моделирование и получены результаты анализа характеристик чувствительности. Разработан функциональный состав и определены технические требования к аппаратуре лидара. Изготовлены прототипы основных функциональных узлов лабораторной установки. Выполнены предварительные испытания аппаратуры.

S.L. LESHCHENKO, D.V. POPOV

*Siberian Federal University, School of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk, Russia*

## **REMOTE AVIATION SENSING METHOD OF ATMOSPHERE TO SEARCH FOR HYDROCARBON RESERVES**

The main results of the development of a promising method of remote laser sensing of the surface layer with the aim of localizing natural oil and gas fields are presented. The developed approach is based on the method of detecting the limiting concentrations of natural gas in the surface layer. The method is based on the phenomenon of resonant absorption of laser radiation inside the contour of the absorption spectrum. The main task of increasing the accuracy and selectivity of the method is solved, which makes it possible to determine extremely small concentrations of natural gas in the surface layer. The solution is based on the use of two infrared He-Ne lasers, with different predetermined wavelengths in the medium wave spectrum, original algorithms for digital signal processing and the varying height of the aircraft summer. An adapted model of the lidar

path has been developed, simulation has been performed and the results of sensitivity analysis have been obtained. The functional composition and technical requirements for the lidar equipment have been developed. Prototypes of the main functional units of the laboratory setup were manufactured. Performed preliminary testing equipment.

В основу разрабатываемой системы положен принцип использования метода активного лазерного дистанционного зондирования приземного слоя [1]. Регистрируя объём рассеянного излучения с отражающей поверхности (рис.1), система способна определять зоны с аномальным содержанием предельных углеводородов [2].

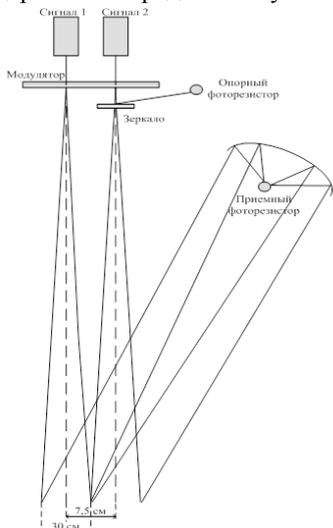


Рис. 1. Схематичное изображение трассы сигналов от модулятора до фоторезисторов

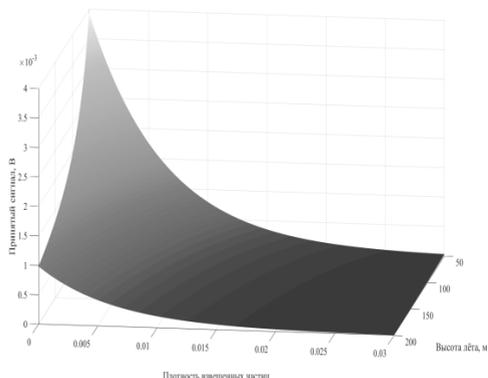


Рис. 2. Моделирование зависимости качества сигнала от высоты лета

Результаты моделирования [3,4] показали допустимость решения задачи обнаружения предельно малых концентраций газа - до 0,01 ppm. Это позволяет создать программно-аппаратный комплекс, способный регистрировать означенную концентрацию в приземном слое посредством лидара, установленного на малом летательном аппарате при вариативной высоте лета от 50 до 150 м (рис. 2) [5].

*Список литературы*

[1] Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2010. – 560 с.

- [2] Математическое и аппаратное обеспечение комплекса геофизических исследований для дистанционного, авиационного зондирования земной поверхности / Тен С.Ф., Непомнящий О.В., Хабаров В.А. / Авиакосмическое приборостроение. 2011. № 10. С. 38-43.
- [3] Lidar beam path model for measuring extremely low concentrations of hydrocarbons in the surface layer. Nepomnyashchiy O., Sirotinina N., Popov D., Leshenko S. Anthology of scientific research papers "Space Engineering, Technologies & Exploration". ECM Space Technologies GmbH, Berlin, Germany, 2018. pp.186-190.
- [4] Dmitry Popov, The LIDAR Technology and Earth Remote Sensing for Small Space Vehicles. / Oleg Nepomnyashchy, Evgeny Veicov, Vladimir Kopilov, Vitalii Khabarov, Dmitry Popov. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015, pp. 306–311. PROCEEDINGS 978-1-4799-7103-9/15/\$31.00 ©2015 IEEE.
- [5] Математическое моделирование лазерно-локационного метода определения предельно малых концентраций углеводородов в приземном слое / Непомнящий О.В., Постников А.И., Попов Д.В. / Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 1. С. 11-17.

О.Г. ДЕВОЙНО, Н.И. ЛУЦКО, А.С. ЛАПКОВСКИЙ  
Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

## МИКРОТВЕРДОСТЬ ФАЗ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ, НАНЕСЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

Исследована микротвердость фаз однослойного мультимодального покрытия, нанесенного лазерной наплавкой самофлюсующегося сплава на основе никеля и бронзы. Получены зависимости микротвердости фаз такого покрытия от скорости и шага наплавки.

O.G. DEVOJNO, N.I. LUTSKO, A.S. LAPKOVSKIJ  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

## PHASES MICROHARDNESS IN MULTIMODAL COATING, DEPOSITED BY LASER CLADDING

The microhardness of the phases of a single-layer multimodal coating, deposited by laser cladding of Ni-based self-fluxing alloy and bronze, was investigated. The dependences of the microhardness of the phases of such a coating on the speed and the pitch of cladding are obtained.

Лазерная наплавка дает возможность создавать так называемые мультимодальные покрытия [1], состоящие из полосчатых слоев, полученных чередованием материалов с различными физико-механическими свойствами. Схема поперечного сечения такого покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 показана на рис. 1.

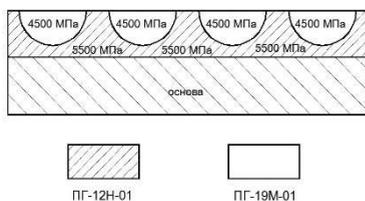


Рис. 1. Схема поперечного сечения мультимодального покрытия

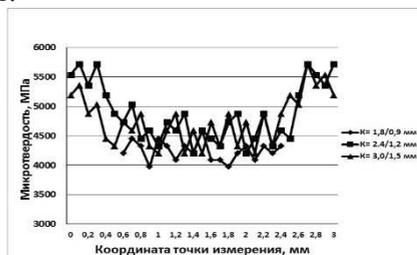


Рис. 2. Распределение микротвердости вдоль поперечного сечения мультимодального покрытия

Из рис. 2 видно, что в поперечном сечении однослойного мультимодального покрытия наблюдается периодичность изменения микротвердо-

сти при переходе из валиков сплава ПГ-12Н-01 в валики бронзы ПГ-19М-01 и снова в валики сплава ПГ-12Н-01.

На рис. 3-6 представлены зависимости средней микротвердости фаз сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в мультимодальном покрытии от скорости наплавки и шага наплавки. Как видно из рис. 3 и 4, средняя микротвердость фаз сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в мультимодальном покрытии уменьшается при увеличении скорости наплавки из-за изменения энерговклада в покрытие.

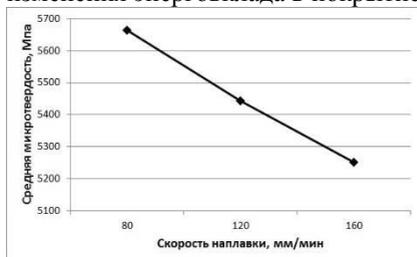


Рис. 3. Зависимость средней микротвердости фазы сплава ПГ-12Н-01 от скорости наплавки

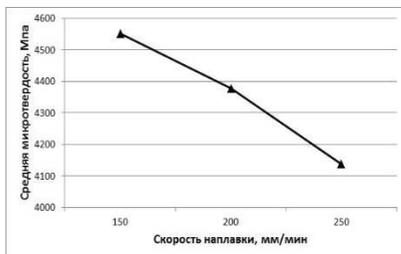


Рис. 4. Зависимость средней микротвердости фазы бронзы ПГ-19М-01 от скорости наплавки

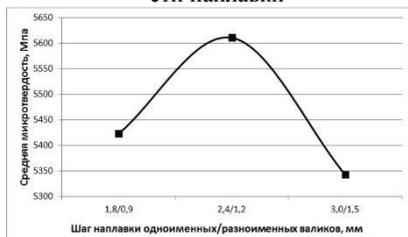


Рис. 5. Зависимость средней микротвердости фазы сплава ПГ-12Н-01 от шага наплавки



Рис. 6. Зависимость средней микротвердости фазы бронзы ПГ-19М-01 от шага наплавки

Зависимости средней микротвердости от шага наплавки (рис. 5 и 6) имеют области с повышенной микротвердостью при шаге наплавки одноименных/разноименных валиков 2,4/1,2 мм за счет хороших условий нагрева-охлаждения при наплавке соседних валиков, когда создаются условия для формирования оптимальной зернистости структуры с повышенной микротвердостью.

#### Список литературы

- [1] J. Ratajski, A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga. – Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings // Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. - I. 2. – P. 35-45.

М. А. ТАРАСОВА, Д. А. КОЧУЕВ, А. Ф. ГАЛКИН,  
С. В. ЖИРНОВА, А. В. ИВАЩЕНКО

*Владимирский государственный университет им. А. Г. И Н. Г. Столетовых,  
Владимир, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТО- СЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СТРУКТУР- НЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА**

В работе экспериментально исследовано явление филаментации при распространении фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных твердых средах. Рассматривается формирование плазменных каналов и образование структурных изменений с измененным показателем преломления в местах самолокализации лазерного излучения. Произведено измерение температуры в области образования плазменного канала.

M.A. TARASOVA, D.A. KOCHUYEV, A.F. GALKIN,  
S.V. ZHIRNOVA, A.V. IVASCHENKO

*Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs, Vladimir, Russia*

## **STUDY OF THE FILAMENTATION PROCESS OF FEMTO- SECOND LASER RADIATION AND STRUCTURAL CHANGES IN QUARTZ GLASS**

In this work, the phenomenon of filamentation was experimentally studied during the propagation of femtosecond laser radiation in transparent solid media. The formation of plasma channels and the formation of structural changes with a modified refractive index in places of self-localization of laser radiation are considered. The temperature was measured in the area of formation of the plasma channel.

Явление филаментации заключается в пространственно-временной локализации энергии мощного лазерного импульса в протяженной нити - филаменте [1-3]. Высокая интенсивность светового поля в филаменте приводит к фотоионизации среды, и вслед за лазерным импульсом формируются плазменные каналы с относительно высокой концентрацией свободных электронов.

В работе [4] разработан экспериментальный стенд для исследования характеристик плазменных каналов. При прохождении высокоинтенсивного лазерного излучения через среду показатель преломления в области локализации излучения становится отличным от основного показателя

преломления среды. Изменение показателя преломления связано с оплавлением участков среды при прохождении высокоинтенсивного лазерного излучения через образец. Формирование структурных изменений обеспечивает перераспределение интенсивности, лазерное излучение распространяется по сформированным каналам. В данной работе произведено измерение температуры сформированных плазменных каналов с использованием цветового пирометра. В качестве источника лазерного излучения использовалась фемтосекундная лазерная система, обладающая следующими параметрами: длина волны излучения  $\lambda = 1029 \pm 2$  нм, длительность импульса излучения  $\tau = 280$  фс, частота повторения импульсов  $f = 10$  кГц, энергия в импульсе  $\epsilon_{max} = 150$  мкДж. Образец – кварцевое стекло марки КУ-1. Схема проведения эксперимента представлена на рис.1.

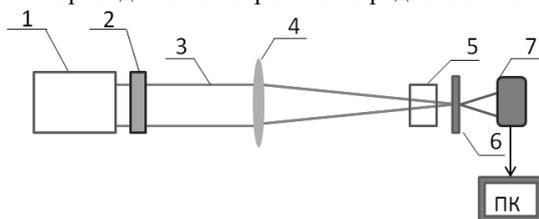


Рис. 1. Экспериментальная схема: 1 – лазер; 2 – поляризационный ослабитель; 3 – лазерное излучение; 4 – фокусирующая линза (150 мм); 5 – образец; 6 – дихроичное зеркало (Thorlabs – DMSP805) и светофильтры (НС-11 и НС-3); 7 – пирометр цветовой

Фокусное расстояние пирометра составляло 24 см, фокусировка производилась в центр образованного плазменного канала. При помощи пирометра было получено значение яркостной температуры, которое составило порядка 2000 К. Яркостная температура связана с истинной температурой зависимостью:  $T = T_b C_2 / (C_2 + \lambda T_b \ln \alpha)$ , где  $T$  – истинная температура,  $T_b$  – яркостная температура,  $\lambda$  – длина волны,  $\alpha$  – спектральный коэффициент поглощения тела,  $C_2 = 0,014388$  м·К [5].

#### Список литературы

- [1] Tarasova M. A., Khorkov K. S., Kochuev D. A., Ivaschenko A. V. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2018. Vol. 45, № 8, P. 246–250.
- [2] Чекалин С. В., Кандидов В. П. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, №2, С. 133–152.
- [3] Кандидов В.П., Шленов С.А., Силаева Е.П. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, №10, С. 873–884.
- [4] Tarasova M., Khorkov K., Kochuev D., Prokoshev V., Ivaschenko A. // Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства: материалы 7-й Междунар. конф. 2018. С. 102-103.

[5] Физический энциклопедический словарь, под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. энциклопедия. 1984. 944 с.

М.В. ПОНАРИНА<sup>1</sup>, А.Г. ОХРИМЧУК<sup>2</sup>, М.П. СМАЕВ<sup>3</sup>,  
М.Г. РЫБИН<sup>1</sup>, Е.Д. ОБРАЗЦОВА<sup>1</sup>, Т.В. ДОЛМАТОВ<sup>1</sup>,  
В.В. БУКИН<sup>1</sup>, И.В. ЖЛУКТОВА<sup>1</sup>, В.А. КАМЫНИН<sup>1</sup>,  
П.А. ОБРАЗЦОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия

## **ДВУХВОЛНОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛНОВОДНОМ Nd:YAG ЛАЗЕРЕ С ИС- ПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕНА**

В данной работе представлен волноводный Nd:YAG лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод. Насыщающийся поглотитель на основе графена нанесен непосредственно на выходное зеркало резонатора. В качестве активной среды используется волноводная структура, диаметр которой обеспечивает генерацию только основной поперечной моды. Разработанный подход позволяет получить генерацию пикосекундных импульсов на длинах волн 1061 и 1064 нм и осуществлять переключение между ними.

M.V. PONARINA<sup>1</sup>, A.G. OKHRIMCHUK<sup>2</sup>, M.P. SMAYEV<sup>3</sup>  
M.G. RYBIN<sup>1</sup>, E.D. OBRAZTSOVA<sup>1</sup>, T.V. DOLMATOV<sup>1</sup>,  
V.V. BUKIN<sup>1</sup>, I.V. ZHLUKTOVA<sup>1</sup>, V.A. KAMYNNIN<sup>1</sup>,  
P.A. OBRAZTSOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup>D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

## **DUAL-WAVELENGTH GENERATION OF PICOSECOND PULSES OF WAVEGUIDE LASER BY USING GRAPHENE**

This paper presents waveguide Nd:YAG laser passively mode-locked with graphene-based saturable absorber. The tubular waveguide structure with diameter of 30  $\mu\text{m}$  ensures the generation of the main transverse mode. The developed compact laser provides generation of picosecond pulses with at 1061 and 1064 nm wavelength and realizes switching between them.

Лазерные источники ультракоротких импульсов с частотой повторения более 1 ГГц широко используются в таких направлениях, как метро-

логия частоты, телекоммуникации и фундаментальные исследования. При разработке данных лазеров ключевой проблемой является повышение и контроль стабильности частоты следования УКИ. Для стабилизации режима синхронизации продольных мод необходимо обеспечить генерацию на основной поперечной моде. В данной работе представлен волноводный Nd:YAG лазер с ГГц частотой повторения, работающий в режиме пассивной синхронизации мод. В качестве активной среды используется волноводная структура с диаметром 30 мкм, созданная в объеме кристалла Nd:YAG [1]. Накачкой служит Ti:Sa лазер с длиной волны 808 нм. Резонатор образован глухим зеркалом, нанесенным на один из торцов кристалла, и выходным зеркалом с насыщающимся поглотителем на основе графена [2]. Для прецизионного контроля длины резонатора выходное зеркало было оснащено пьезоэлектрическим элементом с точностью подстройки 0.04 мкм. Воздушный зазор, образующийся между торцом кристалла и выходным зеркалом, является эквивалентом внутррезонаторного интерферометра. Интерферометр является дисперсионным элементом, и вносит временную задержку распространения излучения на различных длинах волн. Кроме этого, интерферометр обеспечивает спектрально-амплитудную модуляцию внутррезонаторных потерь. Таким образом, в зависимости от ширины интерферометра, наблюдается периодический режим генерации лазера: на одной центральной длине волны 1064 нм или на двух длинах волн 1061 и 1064 нм. Проведенные расчеты параметров резонатора и анализ режимов генерации в данной конструкции волноводного лазера, показал, что непрерывная синхронизация мод не может осуществляться одновременно на двух длинах волн из-за несоблюдения условия компенсации положительной материальной дисперсии Nd:YAG кристалла.

Для осуществления стабильной работы лазера и усиления генерируемых импульсов было предложено использование узкополосного оптического фильтра, объединенного с волоконным Yb усилителем. С помощью данного метода на длине волны 1061 нм была получена стабильная гребенка импульсов с длительностью <20 пс и частотой повторения 9.8 ГГц.

*Список литературы*

- [1] A. Okhrimchuk, et.al. // *Opt. Express*, vol. 20, no. 4, pp. 3832–3843, 2012.
- [2] A. G. Okhrimchuk and P. A. Obraztsov // *Sci. Rep.*, vol. 5, 2015.

Е.И. МАРЕЕВ, Е.А. МИГАЛЬ, Ф.В. ПОТЕМКИН,  
 Физический факультет и Международный учебно-научный лазерный центр МГУ  
 им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## КАРТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМЫ МЕТОДИКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ

Продемонстрирована новая методика картирования лазерно-индуцированной микроплазмы, основанная на методике генерации третьей гармоники. Данная методика обладает субмикронным разрешением и может быть использована для детектирования электронной концентраций начиная с  $10^{-5}n_{cr}$ . Данная методика позволяет детектировать микроплазму, с концентрацией меньшей, чем достигается пороге плазмообразования.

E.I. MAREEV, E.A. MIGAL, F.V. POTEKIN  
 Faculty of Physics and International Laser Center M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## THIRD HARMONIC MAPPING OF LASER-INDUCED MICROPLASMA

A new technique of laser-induced microplasma mapping based on the third harmonic generation is demonstrated. This technique has a submicron resolution and can be used to detect electron concentrations starting from  $10^{-5}n_{cr}$ . This technique allows the detection of microplasma with electron concentration less than at plasma formation threshold.

Современное состояние исследований в области взаимодействия лазерного излучения с веществом ставит новые задачи для методик сверхточных измерений, а именно для увеличения эффективности воздействия необходимо определить размер зоны лазерного воздействия с субмикронным разрешением [1]. В рамках данной работы была разработана новая методика двумерного картирования микроплазмы с субмикронным разрешением, она основана на методике генерации третьей гармоники. Эффективность генерации третьей гармоники в точке с координатами  $(z_0, y_0)$  описывается следующей формулой:

$$\eta(z_0, y_0) \sim \frac{[\chi^{(3)}]^2 w_0^3 E^2}{L_0 \cdot n_{3\omega}} \cdot \left| \int_{z_0-L_0}^{z_0+L_0} \int_{-1}^1 \exp(-\xi^2/2) \frac{\exp(i\Delta k(z-z_0))}{(1+2i(z-z_0)/L_0)^2} dz d\xi \right|, \text{ где } \xi = (y-y_0)/w_0, E -$$

энергия лазерного импульса,  $w_0$  радиус  $(1/e)$  пробного пучка,  $L_0$  - длина

Рэля пробного пучка,  $\Delta k = k_{3\omega} - 3k_{\omega}$ , фазовая расстройка между третьей гармоникой  $k_{3\omega}$  и фундаментальной частотой  $k_{\omega}$ ,  $\chi^{(3)}$  – восприимчивость третьего порядка,  $n_{3\omega}$  – показатель преломления на длине волны третьей гармоники [2]. В случае лазерно-индуцированной микроплазмы фазовая расстройка рассчитывается как  $\Delta k = \Delta k_0 + (8/3) \times \pi n_c(z_0, y_0)$ . Картирование микроплазмы достигается изменением точки за счет изменения точки фокусировки пробного пучка ( $z_0, y_0$ ). Восстановление профиля микроплазмы осуществляется подбором такого профиля плазмы, при котором профиль третьей гармоники совпадает с экспериментальным. Данная методика обладает пространственным разрешением порядка 150 нм, и разрешением по электронной плотности порядка  $10^{-5} n_{cr}$  (критической плотности)

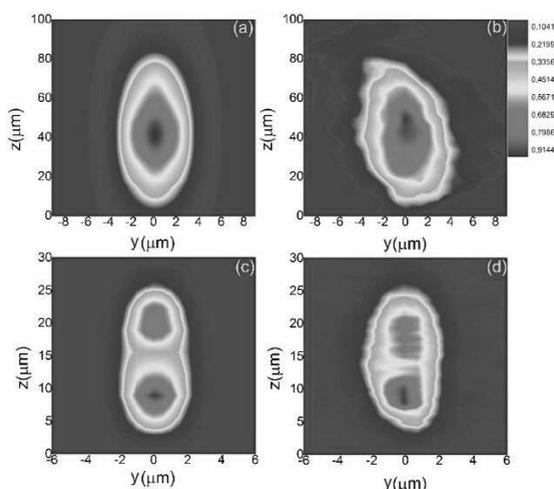


Рис. 1. Экспериментальный (b, d) и теоретический (a, c) профили третьей гармоники. Длина волны 1900 нм, энергия порядка 2 мкДж (a, b); длина волны 1240 нм, энергия порядка 4 мкДж (c, d).

*Список литературы*

- [1] Мареев Е.И., Мигаль Е.А., Потемкин Ф.В.// Письма в ЖЭТФ 2018, Том 107, вып.7, р. 422-425
- [2] Mareev E.I., Migal E.A., Potemkin F.V.// APL 2019 принято в печать

Е.И. МАРЕЕВ<sup>1,2</sup>, В.А. АЛЕШКЕВИЧ<sup>1</sup>, Ф.В. ПОТЕМКИН<sup>1,2</sup>,  
Н.В.МИНАЕВ<sup>3</sup>, В.М.ГОРДИЕНКО<sup>1,2</sup>

*1. Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*2. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия.*

*3. Институт фотонных технологий, ФНИЦ, РАН, Троицк, Россия*

## **ГЕНЕРАЦИЯ СУПЕРКОНТИНУУМА ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ CO<sub>2</sub> В ОКРЕСТНОСТИ ЛИНИИ ВИДОМА**

Исследованы особенности генерации суперконтинуума в режиме филаментации фемтосекундных лазерных импульсов ближнего ИК диапазона в сверхкритическом CO<sub>2</sub>. Экспериментально и с помощью компьютерного моделирования, основанного на молекулярной динамике, продемонстрировано, что кластеризации флюида ведет к увеличению нелинейного показателя преломления (примерно на 35%). Проведена оптимизация генерации суперконтинуума по давлению.

E.I. MAREEV<sup>1,2</sup>, V.A. ALESHKEVICH<sup>1</sup>, F.V. POTECHKIN<sup>1,2</sup>, N.V.  
MINAEV<sup>3</sup>, V.M. GORDIENKO<sup>1,2</sup>

*1. Faculty of Physics M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*2. International Laser Center, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow,  
Russia*

*3. Institute of Photon Technologies of Federal Scientific Research Centre  
Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia.*

## **SUPERCONTINUUM GENERATION UNDER FEMTOSECOND FILAMENTATION IN SUPERCRITICAL CO<sub>2</sub> IN THE VICINITY OF VIDOM LIDOM**

The supercontinuum generation under femtosecond filamentation of near-IR laser pulses in supercritical fluids was studied. It was demonstrated (experimentally and using molecular dynamic simulations) that the clustering leads to the growth of the nonlinear refractive index (approximately by 35%). The supercontinuum generation was optimized with pressure varying.

Исследованы нелинейно-оптические процессы в новом нелинейно-оптическом объекте – сверхкритический флюид (СКФ), который обладают высокими значениями нелинейного показателя преломления, сравнимиыми или даже превышающими значения, характерные для конденсиро-

ванных сред ( $\sim 2\text{-}3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$ ). В окрестности критической точки СКФ величина нелинейного показателя преломления ( $n_2$ ) увеличивается в два раза при росте давления в пределах 10 атм. [1]. Таким образом, появляется возможность работы с использованием среды с управляемым показателем преломления. В работе впервые показана возможность, управления нелинейно-оптическими процессами при плавном изменении параметров среды за счет контроля давления, а не интенсивности фемтосекундного хром-форстеритового лазерного импульса с длиной волны 1.24мкм.

С помощью компьютерного моделирования, основанного на методе молекулярной динамики, впервые показано, что кластеризация СКФ, проявляющаяся в окрестности линии Видома, увеличивает нелинейный показатель преломления.

Экспериментально установлено, что рост нелинейного показателя преломления в условиях кластеризации, в свою очередь, ведет к увеличению эффективности генерации суперконтинуума с шириной более 3-х октав в режиме фемтосекундной филаментации. Проведено сравнение параметров суперконтинуума с аналогичными параметрами для газа высокого давления. Можно ожидать получение похожих результатов по генерации суперконтинуума в сверхкритических флюидах на основе других молекулярных сред, например,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ .

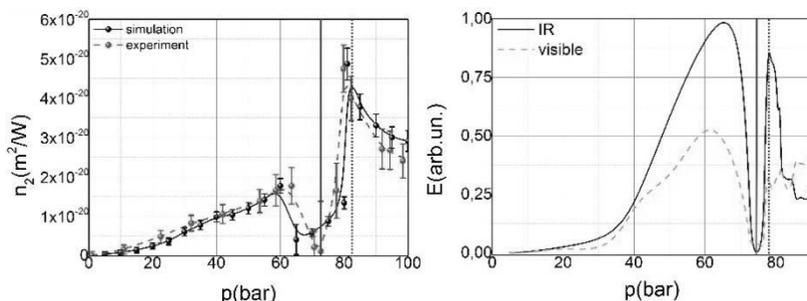


Рис. 1. Зависимость нелинейного показателя преломления от давления (а) и эффективность генерации суперконтинуума (б) в ИК (сплошная линия) и видимом диапазоне (пунктирная линия) от давления  $\text{CO}_2$ . Сплошная линия показывает критическое давление, пунктир обозначает положение линии Видома.

#### Список литературы

- [1] Mareev E., Aleshkevich V., Potemkin F., Bagratashvili V., Minaev N., Gordienko V. // Optics Express, 2018 Vol 26, p. 13229-13238;

В.В. ШЕПЕЛЕВ<sup>1</sup>, Н.А. ИНОГАМОВ<sup>2</sup>, С.В. ФОРТОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт теоретической физики РАН им. Л.Д. Ландау, Москва, Россия*

## **МЕХАНИЗМЫ ЛАЗЕРНОГО ПРОБИВАНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК**

Рассматривается облучение единичным фемтосекундным лазерным импульсом тонкой металлической пленки, нанесенной на подложку из диэлектрика. Описаны два принципиально разных механизма образования отверстий в пленке под действием излучения: тепловой и ударно-волновой. Основным движущим фактором теплового механизма является перенос поглощенной энергии излучения внутри пленки. Ударно-волновой механизм осуществляется за счет постепенного выталкивания кольцевых слоев металла веществом подложки. Образовавшееся в результате ударно-волнового механизма отверстие может значительно превышать по размеру световое пятно. Представлены детальные описания стадий каждого механизма, полученные с помощью численного моделирования.

V.V. SHEPELEV<sup>1</sup>, N.A. INOGAMOV<sup>2</sup>, S.V. FORTOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Computer Aided Design of RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*L.D. Landau Institute for Theoretical Physics of RAS, Moscow, Russia*

## **MECHANISMS OF LASER DISRUPTION OF THIN METAL FILMS**

Two mechanisms for the formation of holes in thin metallic films under femto-second laser irradiation with the single pulse are presented: thermal one and shock-wave one. The main driving factor of the thermal mechanism is transfer of absorbed radiation energy inside the film. The shock-wave mechanism is possible if the film is deposited on a thick dielectric substrate. It is carried out due to annular ejection around the laser spot ring after ring of the metal film by the shock expanding in substrate material. Under the shock-wave mechanism, the formed hole can significantly exceed the size of the laser illuminated spot. Detailed descriptions of the stages of each mechanism obtained by numerical modeling are presented.

В рассматриваемой конфигурации характерная толщина облучаемой металлической пленки составляет 50÷100 нм. Лазерный пучок сфокусирован достаточно в малое пятно, размер которого не превышает 1 мкм и определяется дифракционным пределом.

Тепловой механизм описан с помощью численного решения двумерных уравнений тепловой двухтемпературной модели Анисимова [1]. Ме-

ханическое движение пленки в этом случае не существенно. Стадии процесса: (i) распространение поглощенной в скин-слое энергии лазерного излучения в «продольном» направлении, от фронтальной границы пленки к задней до выравнивания температуры; (ii) боковой перенос энергии вдоль пленки от центра к периферии; (iii) деляминация вещества пленки от подложки.

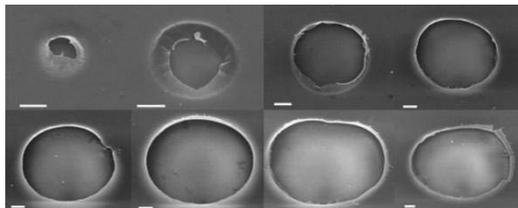


Рис. 1. Фотографии отверстий, образовавшиеся в результате облучения металлической пленки, напыленной на толстую стеклянную подложку [2]. Изображения получены при помощи технологии SEM. Размеры отрезков на каждом фото составляют 1 мкм.

Ударно-волнового механизма образования отверстий описан с помощью гидродинамического численного моделирования на основе уравнений Эйлера. Стадии процесса: (i) генерация ударной волны в подложке из-за передачи энергии от нагретого вещества пленки; (ii) сферизация образовавшейся ударной волны, т.е. переход от одномерного к двумерному режиму распространения; (iii) поперечное распространение ударной волны в подложке вдоль границы с пленкой; (iv) аккумуляция в подложке положительного давления, постепенно выталкивающего металл в сторону от подложки, что и приводит к образованию отверстий. Вещество подложки при этом действует на пленку, как поршень.

Вычислительная часть работы выполнена в ИАП РАН в рамках гос. задания ИАП РАН. Теоретическая часть работы выполнена в ИТФ им. Ландау РАН в рамках гос. Задания ИТФ им. Ландау РАН.

#### *Список литературы*

- [1] С.И. Анисимов, Б.Л. Капелиович, Т.Л. Перельман, Электронная эмиссия с поверхности металлов под действием ультракоротких лазерных импульсов, ЖЭТФ, 66 (2), 776-779 (1974).
- [2] V.V. Shepelev, N.A. Inogamov, P.A. Danilov, S.I. Kudryashov, A.A. Kuchmizhak, O.B. Vitrik, Ultrashort pulse action onto thin film on substrate: Qualitative model of shock propagation in substrate explaining phenomenon of fast growth of a hole with increase of absorbed energy, J. Phys.: Conf. Ser., 1147, 012065 (2019).

Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, А.В. ГОРШКОВА  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ МИКРОФРЕЗИРОВКИ КАК КЛЮЧ К БЫСТРОМУ ПРОТОТИПИРОВАНИЮ КЕРАМИЧЕСКИХ МЭМС-УСТРОЙСТВ**

Описывается технология адаптивной лазерной микрофрезеровки для изготовления керамических МЭМС микронагревательных устройств в радиоэлектронном корпусе устройства поверхностного монтажа (SMD). Текущие результаты показывают, что с использованием описанной технологии возможно изготовление всех частей МЭМС устройства в SMD корпусе с форм-фактором типа SOT-23.

N.N. SAMOTAEV, K.Yu. OBLOV, A.V. GORSHKOVA  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **LASER MICROMILLING TECHNOLOGY AS A KEY FOR RAPID CERAMIC MEMS DEVICES**

The flexible laser micromilling technology for ceramic MEMS producing of microhotplate in the surface mounted device (SMD) package is describing. Current results demonstrate that using described technology possible to manufacturing all parts of MEMS sensor in the SMD form-factor SOT-23 package type.

После экспериментов с широким перечнем керамических материалов применяемых для современных МЭМС-технологий [1] ( $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$ , LTCC и т.д.) на кафедре микро и нанозлектроники НИЯУ МИФИ разработали более гибкую технологию, отвечающую целям философии 3D-прототипов. В качестве технологии изготовления керамического МЭМС микронагревателя в SMD корпусе для создания металлооксидного сенсора предлагается использовать комбинацию лазерной микрообработки монолитной  $Al_2O_3$ , широко имеющейся в продаже и трафаретной печати / струйной (аэрозольной) печати для формирования металлизации МЭМС микронагревателя и составных частях SMD корпуса.

В качестве устройства лазерной микрофрезеровки в работе применялся 4-х координатный программно-аппаратный комплекс на базе установки МиниМаркер-2 производства Лазерный Центр (Санкт-Петербург) с длиной волны 1,064 мкм, неконтактный профилометр и программное обеспечение собственной разработки реализующее адаптивную микрофрезеровку

ку, на базе обратной связи от on-line измерения результатов микрогравировки неконтактным профилометром.

Процесс лазерного микро фрезерования представляет собой сложный многофакторный физический процесс, поведение которого в зависимости от типа обрабатываемого материала имеет различный характер, что требует эмпирического выбора оптимального режима обработки поверхности. Ускорение процесса отладки может быть достигнуто за счет интеграции измерительного оборудования, способного производить визуальный анализ полученной поверхности. После абляции каждого слоя материала такая интеграция позволяет анализировать полученную поверхность и корректировать режим лазерного излучения путем корректировки параметров излучения или введения дополнительных чистящих проходов, направленных только на уменьшение шероховатости поверхности. Подобное машинное обучение является задачей специализированного программного обеспечения, разработанного в рамках создания описанного выше программно-аппаратного комплекса.

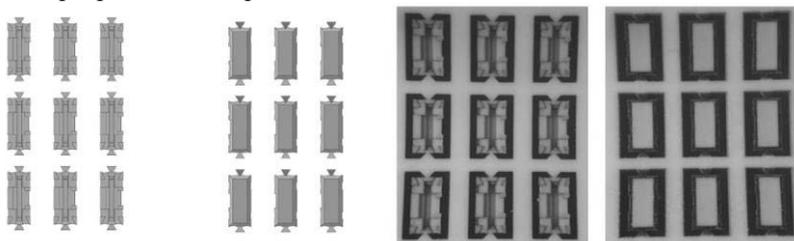


Рис. 1. 3D-модель SMD корпуса в формате \*.stl (изображение взято из программы Autodesk Inventor) и результат двухсторонней лазерной микрогравировки массива типа SOT-23 корпусов по этой 3D-модели.

Опыт нашей работы показал быструю скорость проектирования и изготовления готовых к использованию керамических МЭМС устройств высокого качества с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 14.584.21.0030 от 22.11.2017, уникальный идентификатор RFMEFI58417X0030) в рамках совместного российско-корейского проекта.

#### *Список литературы*

- [1] Vasiliev, A.A., Pislakov, A.V., Sokolov, and others// Sensors and Actuators, B 2016. Vol. 224, P. 700-713.

О.А. ЗОРИНА<sup>1</sup>, А.В. КОРШУНОВА<sup>1</sup>, Н.Н. САМОТАЕВ<sup>2</sup>,  
Е.В. ОСИПОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «ЦНИИС и ЧЛХ» Минздрава России, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## **ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА «ГЕЛЕОФОР» ПРИ АППЛИКАЦИИ В ТКАНЯХ ЗУБОВ**

В исследовании использовался фотосенсибилизатор (ФС) 1% гель «ГЕЛЕОФОР», исходным сырьем которого является микроводоросль *Chlorella ellipsoidea*, содержащая хлорофилл А. Для определения проникновения и накопления ФС в тканях зуба были проведены эксперименты, в ходе которых изучены спектры люминесценции тканей более 20 удаленных зубов: резцов, клыков и премоляров. Фотолюминесценция тканей зубов и ФС возбуждалась полупроводниковым лазером с длиной волны 445 нм.

<sup>1</sup>O.A. ZORINA, <sup>1</sup>A.V. KORSHUNOVA,

<sup>2</sup>N.N. SAMOTAEV, <sup>2</sup>E.V. OSIPOV

<sup>1</sup>Central Research Institute of Dental and Maxillofacial Surgery, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## **ASSESSMENT OF THE IMPACT OF PHOTOSENSIBILIZER “GELEOPHOR” AT APPLICATION IN TEETH TISSUES**

The study used photosensitivity material 1% gel "GELEOPHOR", the raw material of which is the microalga *Chlorella ellipsoidea*, containing chlorophyll A. To determine the penetration and accumulation of photosensitivity material in the tooth tissues, experiments were conducted, during which the luminescence spectra of tissues more than 20 teeth were studied: incisors, canines and premolars. Photoluminescence of the tissues of the teeth and FS was excited by a semiconductor laser with a wavelength of 445 nm.

В стоматологии фотодинамическая терапия (ФДТ) используется при лечении кариеса зубов, его осложнений и заболеваний пародонта. Для ФДТ используют ФС производные хлорина Еб «Фотодитазин», «Радихлорин» и др. Механизм ФДТ основан на фотохимических реакциях и заключается во введении ФС в зону поражения и локальной активации накопившегося в тканях ФС низкоинтенсивным излучением в оптическом диапазоне. Реакция протекает в обязательном присутствии кислорода, при этом ФС переходит в возбужденное состояние и в результате молекуляр-

ный кислород преобразуется в синглетную форму, которая дает выраженный цитотоксический эффект. Уже исследовано накопление ФС в тканях пародонта, кожи и слизистых оболочек, но подробные исследования на тканях зубов таких еще не проводилось.

По результатам экспериментальных исследований, был получен люминесцентный сигнал с поверхности зубов с пиком на длине волны 660 нм, свидетельствующий о наличии ФС на поверхности эмали. Следует отметить, что пик фотолюминесценции препарата хорошо разделяется с фоновыми пиками эмали зубов и имеет меньшую интенсивность по сравнению с препаратом ФС нанесенным на предметное стекло. Для исследования глубины проникновения, на зубы был нанесен ФС с выдержкой 20 минут, далее он был смыт водой и с помощью бора с охлаждением сделаны продольные спилы зубов. Далее был проведен анализ спектра фотолюминесценции с эмали и дентина, по методике аналогичной, что и для целых зубов. В данном случае люминесцентного сигнала от ФС с поверхности спила, соответствующему слою дентину зуба, не наблюдался (Рис.1).

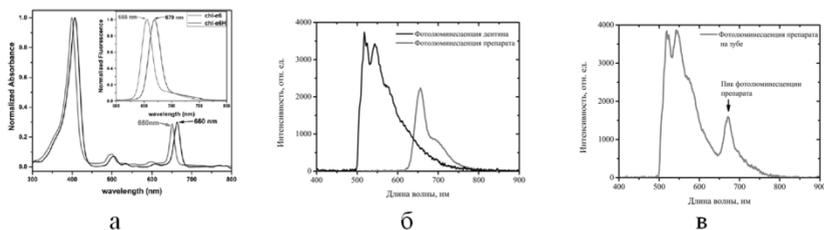


Рис. 1. а - пики поглощения ХЛОРИНА Е6 [1]. б - спектр фотолюминесценции зуба (черный) и препарата «Гелеофор» на стекле (красный), в - спектр фотолюминесценции препарата на поверхности зубной эмали.

В работе для регистрации люминесцентного сигнала использовался портативный спектрометр OceanOpticsUSB2000+. Проведенный флуоресцентный анализ поверхности эмали и дентина зубов продемонстрировал, что фотосенсибилизатор 1% гель «ГЕЛЕОФОР» в течении 20 минут (стандартная длительность процедуры отбеливания) не способен проникать в дентин фронтальной группы зубов, а регистрируется только в слоях эмали зубов, что свидетельствует о его перспективности, как ФС при отбеливания зубов.

#### Список литературы

[1] Gattuso, H., Monari, A., Marazzi, M. // RSC Advances, 2017, Vol. 7 (18), pp. 10992-10999.

Е.И. ОСЕТРОВ, В.М. ИЗГОРОДИН, Е.Ю. СОЛОМАТИНА, А.П. ПЕПЕЛЯЕВ, Е.Ю. ЗАРУБИНА, С.Ю. БАТУКОВ, С.П. БАРИНОВ, А.А. КОСТРИКИНА

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г.Саров*

## **ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЫРАВНИВАНИЮ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ДЕЙТЕРИЯ ПО ТОЛЩИНЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Представлены результаты экспериментов по выравниванию криогенного слоя дейтерия в сферической полистирольной оболочке с помощью инфракрасного излучения, проведены оценочные расчеты качества получаемого криослоя.

E.I. OSETROV, V.M. IZGORODIN, E.Y. SOLOMATINA, A.P. PEPELYAEV, E.Y. ZARUBINA, S.Y. BATUKOV, S.P. BARINOV, A.A. KOSTRIKINA

*Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF), Sarov*

## **EXPERIMENTS ON DEUTERIUM ICE THICKNESS EQUALIZATION BY INFRARED RADIATION**

Results of experiments on equalization of deuterium ice thickness in spherical polystyrene shell by means of infrared radiation and estimating calculations of cryogenic layer quality are given.

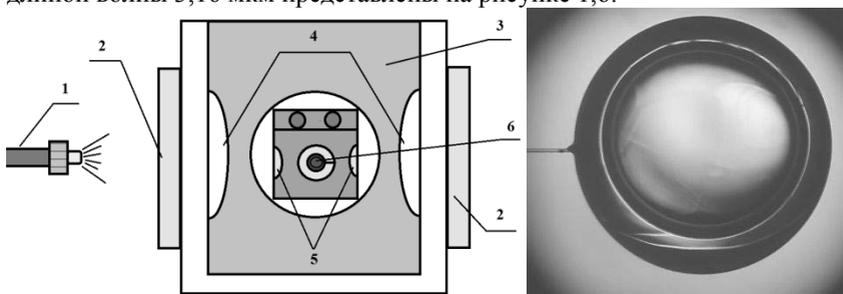
Криогенная мишень для проведения экспериментов по ЛТС представляет собой полимерную оболочку и криогенный слой топлива, замороженный на ее внутренней поверхности. Требования, предъявляемые к качеству твердого водородного слоя, в таких мишенях достаточно высоки: шероховатость поверхности криогенного слоя не должна превышать 1 мкм, разнотолщинность (отклонения от сферичности) - не более 1% [1]. Одним из наиболее эффективных методов выравнивания по толщине криогенного слоя в процессе его формирования является нагрев инфракрасным излучением [2].

Метод нагрева криогенного слоя инфракрасным излучением используется при работе с нерадиоактивными изотопами водорода – дейтерием, протием и их смесями. Он базируется на эффекте поглощения ИК-излучения изотопами водорода. Вещество перераспределяется с более нагретой (и более толстой) в менее нагретую (более тонкую) область на

поверхности слоя. Процесс выравнивания толщины происходит с экспоненциальным затуханием, так как по мере выравнивания градиент температуры на поверхности слоя снижается.

Эксперименты по ИК-нагреву дейтерия в сферической полистирольной оболочке проводились на стенде для исследования мишеней при низких температурах. Использовались две основные схемы проведения эксперимента – внешнее и внутренне облучение.

На рисунке 1,а показана принципиальная схема внешнего облучения. Инфракрасное излучение лазера заводится в полость «сферы выравнивания» специального экспериментального бокса через ИК-прозрачные окна криостата, криоэкрана и бокса. Результаты эксперимента по нагреву криогенного слоя дейтерия с помощью инфракрасного лазера с центральной длиной волны 3,16 мкм представлены на рисунке 1,б.



а)

б)

Рис.1 – а) Принципиальная схема внешнего облучения: 1. Источник инфракрасного излучения; 2. Смотровые окна криостата из кварцевого оптического стекла марки «КУ-1»; 3. Криогенный экран; 4. Окна криогенного экрана; 5. Окна экспериментального бокса из лавсана толщиной 4 мкм; 6. Сферическая оболочка с водородным топливом;

б) Криогенный слой дейтерия после процедуры ИК-нагрева (схема внешнего облучения).

В результате проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований получены криогенные слои дейтерия с разнотолщинностью не более  $11(\pm 2)\%$ .

#### *Список литературы*

- [1] Kucheev S.O., Hamza A.V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 091101.
- [2] Bittner D.N., Collins G.W., Monsler E., Letts S. Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation. // Fusion Technology. 1999. Vol. 35. P. 244.

**П.А. ПАЛКИН А.Б. ЛЮХТЕР**

*Владимирский государственный университет ВлГУ имени А.Г. и Н.Г.  
Столетовых*

## **ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 7000-Й СЕРИИ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИТТЕРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА**

В докладе представлены результаты сравнения двух видов сварки сплава системы Al-Zn-Mg (7000-я серия): излучением иттербиевого волоконного лазера и полуавтоматической в среде защитных газов. В ходе исследования были изучены металлографические образцы сварного соединения и получены результаты механических испытаний.

**P.A. PALKIN A.B. LYUKHTER**

*Vladimir state university VISU named after A.G. and N.G. Stoletovs*

## **7XXX ALUMINUM ALLOY WELDING BY YTTERBIUM FIBER LASER**

Ytterbium fiber laser welding and GMAW of Al-Zn-Mg (7xxx) alloy results will be present in the report. Metallographic samples have been studied and the results of mechanical tests have been obtained during research.

Конвенционные сварочные технологии, связанные с формированием толстостенных швов осложнены необходимостью разделки кромок и использования присадочного материала, значительного тепловложения в сварное соединение; а также образованием широкого сварного шва (СШ) и зоны термического влияния (ЗТВ).

Метод сварки трением с перемешиванием осуществляется без разделки кромок, однако приводит к формированию широкого сварного шва [1]. Высококачественная аргонодуговая сварка сплавов 7000-й серии с разделкой кромок требует использования специальной присадочной проволоки с использованием редкоземельных элементов [2]. Применение АМг и АМц присадочных проволок приводит к образованию на границах: СШ, ЗТВ и основного металла значительных внутренних напряжений, в виду структурной неоднородности сварного соединения, частично устраняемой путем дополнительной термообработки.

В докладе представлены результаты лазерной сварки (ЛС) без разделки кромок и полуавтоматической сварки (ПС), с заполнением разделки

проволокой сплава АМг, листовых заготовок, толщиной 20 мм, алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg. Исследование технологии ЛС излучением иттербиевого волоконного лазера выполнялась на лазерном роботизированном комплексе ЛРК-5 НОЦ ВЛТ ВлГУ [3]. Была исследована структура и проведены испытания твердости поверхности металлографических шлифов сварных соединений, проведены механические испытания пределов прочности.

При односторонней ЛС проплав составил более половины толщины заготовки. Двусторонняя ЛС характеризуется полным проплавом заготовок. Применение защитного газа (аргона) обеспечило соединение уровня качества В (высший) по классификации ISO 13919-2-2001 Welding; Electron and laser beam welded joints: Aluminium and its weldable alloys.

Ширина ШШ и ЗТВ образцов, полученных лазерной сваркой (ЛС) (рис. 1 – слева), в 2÷3 раза уже в сравнении с контрольным. Предел прочности сварного соединения ЛС составил 290 МПа, в то время как для ПС 245 МПа.



Рис. 1. Сравнение структур сварных соединений сплава на основе Al-Zn-Mg, полученных ЛС и ПС.

Замена ПС на ЛС иттербиевым лазером, с использованием ЛРК, позволит обеспечить минимальные размеры сварного соединения без разделки кромок при увеличении скорости сварки до 6 раз и прочности сварного соединения на 15%.

#### Список литературы

- [1] Фролов В.А., Конкевич В.Ю., Предко П.Ю., Белоцерковец В.В. Сварка трением с перемешиванием термически упрочняемого сплава В95 системы Al-Zn-Mg-Cu // Сварочное производство. 2013. №3, С. 21-26.
- [2] Сварка высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu // Авиационные материалы и технологии. 2003. №3, С. 32-39.
- [3] Исследование процесса формирования сварного соединения, полученного лазерной сваркой внахлест алюминиевого сплава амг2м и стали ст3 // Материаловедение. 2018. №3, С. 26-30.

Р.Д. ГЛУХОВ, Т.В. КАЗИЕВА, А.П. КУЗНЕЦОВ, К.Л. ГУБСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ТВЕРДОМЕРОВ, ОСНОВАННЫХ НА МЕТОДЕ ЛИБА**

Разработана система для калибровки твердомеров, основанная на одноканальном волоконном интерферометре с прямым преобразованием доплеровских сигналов. Система позволяет измерять скорости до 10м/с с точностью до 0.001 м/с. Проведена серия экспериментов, подтверждающая характеристики прибора.

R.D. GLUKHOV, T.V. KAZIEVA, A.P. KUZNETSOV,  
K.L. GUBSKIY

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

## **DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR CALIBRATION OF LEEB HARDNESS TESTER**

A system for calibrating hardness gauges based on a single-channel fiber interferometer with direct conversion of Doppler signals has been developed. The system allows you to measure speeds up to 10m / s with an accuracy of 0.001 m / s. A series of experiments confirming the characteristics of the device.

Метод Либа – один из наиболее популярных методов измерения твердости металлов, основанный на измерении отношения скорости бойка до и после взаимодействия с поверхностью исследуемого образца.

Основной проблемой измерения твердости металлов при помощи твердомеров, основанных на методе Либа, является необходимость обеспечения строго определенных скоростей индентора (с точность до 0.0025 мс) непосредственно перед моментом удара, и максимально точным измерением скорости бойка после взаимодействия с измеряемым образцом. Измерение скорости индентора в портативных твердомерах осуществляется методом магнитной индукции, однако использование в полевых условиях приводит к их износу, что приводит к необходимости проведения периодических калибровок.

В настоящее время для регистрации скоростей объектов в основном используется методика PDV (Photonic Doppler Velocimetry), основанная на использовании волоконных комплектов для формирования гетеродинного сигнала биений при смешении отраженного от поверхности объекта лазерного излучения с опорным. Данная методика невосприимчива к

внешним воздействиям, точна и проста в реализации. Поэтому именно методика PDV была взята за основу проектируемого интерферометра.

Изготовленная по методике PDV система работает следующим образом. Излучение одночастотного непрерывного лазера подводится к исследуемому объекту по оптоволоконному кабелю, на конце которого закрепляется линза. Излучение лазера фокусируется на движущейся поверхности при помощи GRIN линзы. Та же самая линза в последствии собирает часть излучения, отраженного или рассеянного движущимся объектом. Далее по волокну излучение подводится к детектору. Для всех гетеродинных методов часть излучения лазера также по оптоволокну направляется на детектор. В результате при смешении двух сигналов с разными частотами на фотоприемнике формируются биения, которые регистрируются осциллографом.

Характер изменения частоты сигнала однозначно определяет скорость движения объекта. Для нахождения частоты регистрируемого сигнала применяется оконное Фурье преобразование. Его суть заключается в переводе функции из временной зависимости в частотную. В данном случае при цифровой обработке данных вместо непрерывного сигнала используется дискретная функция, полученная при разбиении сигнала с характерным шагом (шириной окна). В зависимости от ширины окна, можно получить различное разрешение по времени и неопределенность по частоте. Далее происходит перевод полученной спектральной зависимости в зависимость скорости объекта от времени и расчет погрешностей.

С помощью разработанной системы были проведены серии экспериментов по измерению профилей скорости ударника в твердомерах различных конструкций. Полученные результаты подтверждают характеристики разработанной системы.

*Список литературы*

- [1] M Gorbashova, I Burdonskiy, K Gubskiy and others//Journal of Physics: Conf. Series 2017 Vol. 941

С.А. СУББОТИН, Н.С. ВОРОНОВА, Ю.Е. ЛОЗОВИК

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## ГИДРОДИНАМИКА ХОЛОДНОЙ ЭКСИТОННОЙ СВЕРХ-ТЕКУЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Рассмотрена система не прямых экситонов в лазерной ловушке с пространственно-разделенной накачкой. Применяется гидродинамическая модель к изучению кинетики экситонного бозе-конденсата в системе с круговой геометрией. Получен квадратичный гамильтониан и система интегрально-дифференциальных уравнений для профилей плотности и скорости конденсата экситонов.

S.A. SUBBOTIN, N.S. VORONOVA, YU.E. LOZOVIK

*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia*

## HYDRODYNAMICS OF COLD EXCITON SUPERFLUID

System of indirect excitons in a laser-induced trap with a spatially separated pump is considered. Hydrodynamic model is employed to study the behavior of the exciton Bose condensate with a ring geometry. As a result, we derive the quadratic Hamiltonian and a set of integro-differential equations for the stationary profiles of the exciton condensate density and velocity.

Экситон – это метастабильное связанное состояние возбужденного электрона и дырки [1], образующееся при возбуждении фотоном электрона из валентной зоны полупроводника в зону проводимости за счет кулоновского притяжения электрона с положительно заряженной дыркой, возникшей из-за этого перехода. Таким образом, экситон представляет собой электронейтральный композитный бозон. В эксперименте [2] система экситонов находится в ловушке, образованной лазером накачки с кольцевым профилем (рис 1а). Кольцо экситонов сужается (рис. 1b, c), причем по мере движения к центру экситонная жидкость остывает до температур меньше 1 К и релаксирует в наименее энергетические состояния, тем самым способствуя предполагаемому образованию бозе-конденсата.



Рис. 1. Графики интенсивности фотолюминесценции экситонов [2].

Для описания динамики и спектра возбуждений образовавшейся системы применяется гидродинамическая модель [3], основанная на вариации функционала свободной энергии по возмущениям плотности и скорости жидкости над их равновесными значениями. Свободная энергия при наличии утечки имеет вид:

$$\mathcal{F} = \int \psi^*(r) \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \frac{1}{2} \int U(r-r') |\psi(r')|^2 dr' - \mu \right) \psi(r) dr + \frac{i\hbar}{4} \int \frac{1}{\tau(r)} \left( \frac{\psi_0^*(r)}{\psi_0(r)} \right) \psi(r) \psi(r) - \text{c. c.} \right) dr \quad (1)$$

где  $\psi(r) = \sqrt{\rho(r)} e^{i\phi(r)}$  – волновая функция системы,  $\psi_0(r)$  – параметр порядка бозе-конденсата,  $\tau(r)$  – локальное время жизни частиц,  $U(r)$  – парный потенциал взаимодействия непрямых экситонов. В результате вариации свободной энергии (1) была получена система интегрально-дифференциальных уравнений для стационарных профилей плотности и скорости сверхтекучей жидкости с учетом круговой геометрии задачи, а также квадратичный по возмущениям гамильтониан системы. Уравнения на стационарный профиль плотности и скорости имеют вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left( \nabla \left( \rho_0(r) \mathbf{v}(r) \right) - \frac{\rho_0(r)}{\tau(r)} - \rho_0(r) \mathbf{v}(r) \delta(s(r)) \right) \nabla s(r) = 0, \\ & \left( \frac{m}{2} \mathbf{v}^2(r) + \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{(\nabla \rho_0(r))^2}{4\rho_0^2(r)} - \frac{\nabla^2 \rho_0(r)}{2\rho_0(r)} + \frac{\nabla \rho_0(r)}{2\rho_0(r)} \right) \delta(s(r)) \nabla s(r) \right) - \int U(r-r') \rho_0(r') dr' + \mu = 0, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $\rho_0(r)$  – равновесная сверхтекучая плотность,  $\mathbf{v} = \frac{\hbar}{m} \nabla \phi_0$  – скорость течения конденсата,  $s(r)$  – уравнение границы рассматриваемой двумерной области. Вторая вариация свободной энергии (1) после квантования дает квадратичный по возмущениям гамильтониан системы:

$$\hat{H} = \int \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \rho_0(r) (\nabla \hat{\phi}'(r))^2 + \frac{2m\mathbf{v}(r)}{\hbar} \hat{\rho}'(r) \nabla \hat{\phi}'(r) + \frac{\nabla \rho_0^2(r)}{4\rho_0^3(r)} (\hat{\rho}'(r))^2 - \frac{\nabla \rho_0(r)}{4\rho_0^2(r)} \hat{\rho}'(r) \nabla \hat{\rho}'(r) + \left( \frac{\nabla \hat{\rho}'(r)}{4\rho_0(r)} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} \hat{\rho}'(r) \int U(r-r') \hat{\rho}'(r') dr' - \frac{\hbar}{\tau(r)} \hat{\rho}'(r) \hat{\phi}'(r) \right] dr, \quad (3)$$

где  $\hat{\phi}'(r)$  и  $\hat{\rho}'(r)$  есть возмущения фазы и плотности, соответственно. Система уравнений (2) решается с помощью метода последовательных приближений для интегрально-дифференциальных уравнений [4] и позволяет определить стационарный профиль плотности и скорости конденсата, который может наблюдаться экспериментально. Гамильтониан после его диагонализации дает боголюбовский спектр изучаемой жидкости.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 18-32-20180 мол\_а\_дк.

#### Список литературы

- [1] R.S. Knox, *Theory of excitons*. New York: Academic (1963).
- [2] A.T. Hammack, M. Griswold, L.V. Butov et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 227402 (2006).
- [3] Wen-Chin Wu and A. Griffin, *Phys. Rev. A* **54**, 4204 (1996).
- [4] C.A. Gelmi, H. Jorquera, *Computer Physics Communications* **185**, 392 (2014).

С.Б. ДОНАЕВ, Б.Е. УМИРЗАКОВ

*Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова, г. Ташкент, Узбекистан*

## **ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Pd–Ba, АКТИВИРОВАННОГО ЛАЗЕРНЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ**

Проведен сравнительный анализ влияния температурной и лазерной активировки на значения коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) и работу выхода  $e\phi$  сплава Pd-Ba (Ba – 1,5 ат.%). Показано, что оптимальная плотность энергии лазерного облучения равна  $\sim 2$  Дж·см<sup>-2</sup>. Определены основные причины уменьшения эмиссионной эффективности Pd-Ba при длительном прогреве.

S.B. DONAEV, B.E. UMIRZAKOV

*Tashkent State Technical University named by I.Karimov, Tashkent city, Uzbekistan*

## **EMISSION PROPERTIES OF THE Pd–Ba ALLOY ACTIVATED BY LASER IRRADIATION**

Distortions of the displacements measured by the heterodyne interferometer due to penetration of the electric excitation signal of the acousto-optic modulator into the path of registration and processing of optical signals are considered. The level of this type of noise is estimated and the ways of its elimination from data obtained using a three-coordinate heterodyne interferometer are proposed.

В современных электровакуумных приборах СВЧ, в частности импульсных магнетронах до сих пор успешно используются сплавные катоды типа Pd-Ba. Однако с переходом к наноразмерным слоям существенно увеличивались требования к размерам и микроструктуры поверхности, однородности состава, электрическим параметрам и сроку службы этих катодов.

Для применения сплавных катодов типа Pd-Ba в различных устройствах, например, в магнетронах, сначала (иногда периодический) проводится их активировка высокотемпературным прогревом до  $T = 800\text{--}1100$  К в течение 3–5 часов в условиях сверхвысокого вакуума или в атмосфере азота или водорода. В связи с этим эти катоды изготавливаются в виде цилиндра и в внутри цилиндра размещается специальный узел нагрева. Для увеличения эмиссионной способности катода можно использовать метод низкоэнергетической ионной имплантации [1]. Основным преимуществом ионной имплантации является то, что этот метод можно исполь-

зовать для катодов, вышедших из строя после длительной эксплуатации. Однако, и в этом случае после эксплуатации в течение 200–300 часов необходимо будет проводить активировку при  $T=700-800$  К. Как проведение высокотемпературного прогрева, так и ионной бомбардировки катодов связаны с очень многими трудностями (громоздкость установки, большое потребление электроэнергии, необходимость герметизации узла нагрева и др.) и неконтролируемыми эффектами. Поэтому очень важно изыскать другие методы активировки, например, лазерной обработки.

На рисунке представлена динамика изменения максимального значения коэффициента ВЭЭ  $\sigma_m$  и значения работы выхода  $e\phi$  сплава Pd-Ba при активировке температурным прогревом и лазерным облучением. Из рисунки видно, что в случае прогрева при относительно низких температурах ( $T \leq 600$  К), когда на поверхности Pd-Ba содержится значительное количество примесных атомов, а диффузия Ba к поверхности еще мала, вторично-эмиссионные характеристики поверхности меняются незначительно. Высокотемпературный прогрев ( $T \geq 1000$  К) приводит к резкому снижению концентрации примесных атомов и увеличению в поверхностных слоях относительной концентрации атомов Ba, что способствует существенному увеличению  $\sigma_m$  и уменьшению  $e\phi$ .

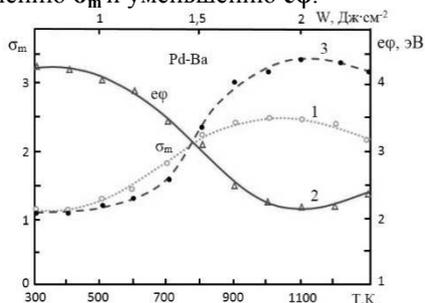


Рис. 1. Зависимости значения  $\sigma_m$ ,  $e\phi$  от температуры прогрева (1,2) и плотности энергии лазерного облучения (3) для сплава Pd-Ba:

1,3 –  $\sigma_m$ , 2 –  $e\phi$ .

Сравнительный анализ показал, что в условиях высокого вакуума лазерная активировка приводит к значительно большему увеличению  $\sigma_m$ , чем в случае температурной активировки. Это объясняется интенсивным удалением примесных атомов O, C, S под действием лазерных лучей. Определены оптимальные режимы лазерной активировки.

*Список литературы*

- [1] Умирзаков Б.Е, Донаев С.Б. Модификация поверхности Pd и Pd-Ва ионной бомбардировкой // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. 2014. вып. 2 (521), с.65–72.

Т.А. СЕМЕНОВ<sup>1,2</sup>, И.А. ЖВАНЯЯ<sup>1</sup>,  
М.С. ДЖИДЖОЕВ<sup>1</sup>, В.М. ГОРДИЕНКО<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Физический факультет и МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова  
<sup>2</sup>ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва

## РЕГИСТРАЦИЯ АНИЗОТРОПИИ ВЫХОДА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ СУБРЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛАЗЕРНО-КЛАСТЕРНОЙ НАНОПЛАЗМЫ

Зарегистрирован анизотропный выход рентгеновского излучения при воздействии на кластеры аргона фемтосекундных лазерных импульсов субрелятивистской интенсивности ( $\sim 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>). Получены изображения лазерных филаментов и проведена оценка их размеров.

T.A. SEMENOV<sup>1,2</sup>, I.A. ZHVANIYA<sup>1</sup>,  
M.S. DZHIDZHOEV<sup>1</sup>, V.M. GORDIENKO<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Faculty of Physics and ILC M.V. Lomonosov Moscow State University  
<sup>2</sup> Federal Research Centre 'Crystallography and Photonics', RAS, Moscow

## OBSERVATION OF ANISOTROPIC X-RAY YIELD FROM SUBRELATIVISTIC LASER-CLUSTER NANOPLASMA

Anisotropy of the x-ray yield was detected during irradiation of argon clusters by subrelativistic ( $1\sim 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>) femtosecond laser pulses. Images of laser filaments were recorded and their sizes were evaluated.

При воздействии сверхинтенсивных ( $I > 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>) фемтосекундных лазерных импульсов на атомарный кластерный пучок выход высокоэнергетических электронов из кластерной наноплазмы анизотропен [1]. Можно ожидать, что и выход рентгеновских квантов из кластерной наноплазмы, инициированных в результате действия электронов плазмы, также будет анизотропен.

В проведенных экспериментах обнаружено, что интегральный выход рентгеновских квантов при воздействии спектрально-ограниченного фемтосекундного титан-сапфирового лазерного излучения субрелятивистской интенсивности ( $1\sim 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>) на кластерную струю аргона (давление над газодинамическим соплом 20 атм.) анизотропен. Сигнал, регистрируемый рентгеновским ФЭУ, установленным под углом  $45^{\circ}$  к оси лазерного пучка, при горизонтальной лазерной поляризации выше в 1.3 раза, чем в случае вертикальной поляризации. Проведенные измерения рентгеновского

спектра лазерно-кластерной плазмы аргона [2] позволяют предположить, что интегральный выход рентгеновского излучения увеличивается в основном за счет характеристических квантов аргона ( $K\alpha \sim 3$  кэВ). При использовании chirпированных лазерных импульсов ( $\sim 250$  фс) той же энергии, интегральный выход рентгеновского излучения не менялся при повороте поляризации. Он уменьшался в 3 раза в сравнении со случаем спектрально-ограниченных лазерных импульсов (при горизонтальной поляризации). В эксперименте регистрировались боковые изображения фемтосекундных филаментов, сопутствующих распространению лазерного пучка в кластерной среде при двух состояниях линейной поляризации лазерного излучения. Выявлено, что при вертикальной поляризации светимость плазменных каналов примерно в 4 раза выше, чем при горизонтальной поляризации. Это связано с возросшей эффективностью Томсоновского рассеяния. Оценены размеры филаментов. В случае использования спектрально ограниченных лазерных импульсов продольные и поперечные размеры филаментов при горизонтальной поляризации оказались  $748 \pm 134$  мкм и  $32 \pm 8$  мкм соответственно. В случае же отрицательно chirпированных лазерных импульсов ( $\sim 250$  фс) длина плазменных каналов не зависела от поляризации и оставалась на уровне  $1225 \pm 210$  мкм. При использовании горизонтальной поляризации воздействующего излучения в режиме заглупления лазерного фокуса за ось кластерной струи наблюдается “просветление” зоны взаимодействия. За камерой взаимодействия наблюдался слабо расходящийся ( $\sim 5$  мрад) световой пучок, возникавший вследствие филаментации лазерного излучения. При этом спектр излучения, прошедшего кластерную струю, испытывал уширение в синюю область до 700 нм, а также модуляцию возникшую, вероятно, вследствие взаимодействия лазерного излучения с плазменными волнами. Оценка сверху диаметра филамента, выполненная исходя из данных о расходимости светового пучка, дает величину  $\sim 80 \pm 32$  мкм.

Работа поддержана Проектами РФФИ 18-52-41007 и 16-32-60171.

#### *Список литературы*

- [1] V. Kumarappan, M. Krishnamurthy, D. Mathur. Asymmetric emission of high-energy electrons in the two-dimensional hydrodynamic expansion of large xenon clusters irradiated by intense laser fields. *Phys. Rev. A*, vol. 67, iss. 4 (2003).
- [2] I.A. Zhvaniya, M.S. Dzhidzhoev, V.M. Gordienko. Generation and diagnostics of mixed Ar/Kr clusters. Tunable source of dual energy X-rays based on the clusters excitation by fs-laser. *IEEE Proceed. of Intern. Confer. ICLO-2018*, Publisher: IEEE, p.255. DOI: 10.1109/LO.2018.8435391.

Т.Т. КОНДРАТЕНКО, М.Н. ДМИТРИЕВА, П.В. МАКСИМОВ,  
В.Н. ПУЗЫРЁВ, А.Т. СААКЯН, А.Н. СТАРОДУБ

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

## **ТРУБЧАТЫЙ АКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА И СПОСОБ ЕГО НАКАЧКИ**

Разработан активный элемент (Nd-стекло, YAG, керамика) в виде полого тонкостенного цилиндра малой высоты по сравнению с диаметром для твердотельного квантового генератора. Применение активного элемента указанной формы позволяет повысить эффективность использования импульса накачки (увеличить КПД накачки), подавить термоупругие напряжения, возникающие в активном элементе, а также повысить частотность при работе лазера.

T.T. KONDRATENKO, M.N. DMITRIEVA, P.V. MAKSIMOV,  
V.N. PUZYREV, A.T. SAHAKYAN, A.N. STARODUB

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

## **TUBULAR ACTIVE ELEMENT OF A SOLID-STATE QUANTUM GENERATOR AND A METHOD FOR ITS PUMPING**

The active element (Nd-glass, YAG, ceramics) with the form of a hollow thin-walled cylinder of small height, compared with the diameter was developed for a solid-state quantum generator. The use of the active element of this form allows to increase the efficiency of the pump pulse (to increase the pump efficiency), to suppress the thermoelastic stresses arising in the active element, as well as to increase the frequency of the laser operation.

Известно, что при конструировании твердотельных квантовых генераторов (усилителей) с большим объемом активной среды возникают трудности с её равномерным охлаждением для подавления возникающих термоупругих напряжений, равномерным распределением импульса накачки и др. [1-3]. Для преодоления указанных недостатков разработан активный элемент [4] (Nd-стекло, YAG, керамика) в виде полого тонкостенного цилиндра малой высоты по сравнению с диаметром для твердотельного квантового генератора (Рисунок 1).

Линейки диодов накачки располагают вдоль образующих по внешней и внутренней поверхностям трубчатого активного элемента, по касательной к поверхности цилиндра. Излучатели по внутренней поверхности ци-

линдра располагаются по середине расстояния излучателей, расположенных по внешней поверхности, а их излучающие поверхности направлены навстречу друг другу. Промежутки поверхности активного элемента между излучающими линейками накачки покрывают металлической светоотражательной плёнкой-серебром, алюминием, золотом и т.д. Во время работы трубчатого активного элемента охлаждающий агент (воду, либо легкокипящую жидкость) подают одновременно на внутреннюю и внешнюю поверхности активного элемента со смонтированными на них излучающими диодными линейками. Применение активного элемента указанной формы позволяет повысить эффективность использования импульса накачки (увеличить КПД накачки), подавить термоупругие напряжения, возникающие в активном элементе, а также повысить частотность при работе лазера.

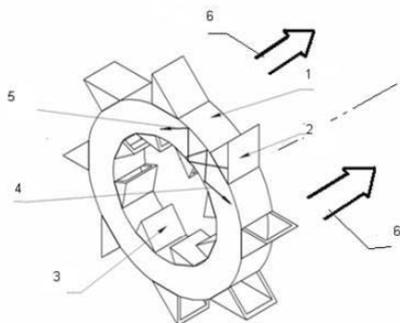


Рис. 1. Полый цилиндрический активный элемент и система его накачки: 1 - полый активный элемент (Nd-стекло); 2 - диодная линейка на внешней поверхности полого цилиндрического активного элемента; 3 - диодная линейка на внутренней поверхности полого цилиндрического элемента; 4, 5 – ход лучей накачки в объеме элемента, 6 - поток генерируемого излучения.

*Список литературы*

- [1] Гулев В.С., Микерин С.Л., Ключников А.А., Угожаев В.Д., Нестеренко В.Ф., Юркин А.М.// Квант. Эл. 2001. Том 31. № 10, С. 867–869.
- [2] Виноградов А.В., Гаганов В.Е., Гаранин С.Г., Жидков Н.В., Кротов В.А., Мартыненко С.П., Поздняков Е.В., Соломатин И.И.// Квант. Эл. 2011. Том 41. № 11, С. 1037–1039.
- [3] Алпатьев А.Н., Смирнов В.А., Щербаков И.А.// Квант. Эл. 2009. Том 39. № 11, С. 1033–1040.
- [4] Кондратенко Т.Т., Стародуб А.Н., Пузырёв В.Н., Максимов П.В., Саакян А.Т., Дмитриева М.Н.// Патент РФ № 2664761.

И.Ю. ТИЩЕНКО<sup>1</sup>, К.Л. ГУБСКИЙ<sup>1</sup>, В.А. ПИРОГ<sup>1</sup>, Г.М. ОЛЕЙНИК<sup>2</sup>, А.В. БРАНИЦКИЙ<sup>2</sup>, Я.Н. ЛАУХИН<sup>2</sup>, И.Н. ФРОЛОВ<sup>2</sup>,  
А.П. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
<sup>2</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

## **ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЛАЙНЕРА, УСКОРЯЕМОГО МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1**

Проведены работы по отработке возможности использования магнитного поля для разгона металлических фляеров и создания импульсов высоких давлений [1]. «АНГАРА-5-1» способна генерировать напряжения до 1,5 МВ и токи до 6 МА. При пропускании таких токов через систему проводников, в которой токи по аноду и катоду протекают в противоположных направлениях, возникает отталкивающая сила, под действием которой материал электрода образует лайнер со скоростью до 10 км/с. Такой лайнер можно использовать в качестве ударника для изучения поведения вещества при ударно-волновом нагружении.

I.Yu. TISHCHENKO<sup>1</sup>, K.L. GUBSKIY<sup>1</sup>, V.A. PIROG<sup>1</sup>, G.M. OLEINIK<sup>2</sup>, A.V. BRANITSKIY<sup>2</sup>, Ya.N. LAUKHIN<sup>2</sup>, I.N. FROLOV<sup>2</sup>,  
A.P. KUZNETSOV<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (TRINITI)

## **LASER MEASUREMENT SYSTEM FOR MEASURING THE SPEED OF THE LINER ACCELERATED BY THE MAGNETIC FIELD ON INSTALLATION ANGARA-5-1**

Work has been carried out to test the possibility of using a magnetic field to disperse metal flyers and create high-pressure pulses [1]. "ANGARA-5-1" is able to generate voltages up to 1.5 MV and currents up to 6 MA. When such currents are passed through a system of conductors in which the anode and cathode currents flow in opposite directions, a repulsive force arises, under the action of which the electrode material forms a liner at a speed of up to 10 km/s. Such a liner can be used as a drummer to study the behavior of the substance under shock wave loading.

На сильноточной импульсной установке «АНГАРА-5-1» проводятся работы по отработке возможности использования магнитного поля для разгона металлических флаеров и создания импульсов высоких давлений [1]. «АНГАРА-5-1» способна генерировать напряжения до 1,5 МВ и токи до 6 МА. При пропускании таких токов через систему проводников, в которой токи по аноду и катоду протекают в противоположных направлениях, возникает отталкивающая сила, под действием которой материал электрода образует лайнер со скоростью около 10 км/с. Такой лайнер можно использовать в качестве ударника для изучения поведения вещества при ударно-волновом нагружении.

В предварительных экспериментах для диагностики использовались теневое фотографирование и трехканальный квадратурный неравноплечный интерферометр (conventional VISAR). Результаты данных экспериментов продемонстрировали возможность ускорять лайнеры до скоростей порядка нескольких км/с. Вместе с тем, был выявлен ряд трудностей, в частности, изменение агрегатного состояния вещества флаера, а также сильное влияние помех. Эти исследования потребовали развития измерительного аппарата и совершенствования постановки эксперимента.

В докладе описано устройство разработанного диагностического комплекса, состоящего из двух неравноплечных интерферометров, образующих нониусную пару [2].

Одновременное измерение скорости двумя интерферометрами с разными линиями задержки (линия задержки КДНИ – 1280 м/с/полосу, КНИ – 7730 м/с/полосу) позволяет избавиться от неоднозначности определения скорости при ее резком изменении. Также использование нониусной системы регистрации позволяет повысить точность измерения профилей скорости.

В докладе приводятся результаты первых экспериментов по разгону металлической пластины импульсом тока, в которых использовался данный комплекс. Получены скорости порядка 6 км/с, данные двух интерферометров хорошо согласуются.

Работа поддержана РФФ, грант 16-12-10487.

#### *Список литературы*

- [1] Е.В. Грабовский, А.Н. Грибов, Г.М. Олейник, С.И. Ткаченко, А.О. Шишлов. Увеличение эффективности ускорения флаера при удлинении импульса тока на установке АНГАРА-5-1 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 4.
- [2] K.L. Gubskii, D.S. Koshkin, A.V. Mikhaylyuk, A.M. Korolev, V.A. Pirog, A.P. Kuznetsov. Multipoint vernier VISAR interferometer system for measuring mass velocity in shock wave experiments // Physics Procedia, 2015, v. 71, pp. 212 – 216.

П. П. ТРОХИМЧУК

*Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки,  
Луцк, Украина*

## **НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ОПТИКИ**

Обсуждаются проблемы моделирования ударных процессов релаксационной оптики на основании экспериментальных результатов по лазерно-индуцированному образованию каскадов разрушений в карбиде кремния. Показан вклад черенковского излучения, дифракционных эффектов и давления света в результаты эксперимента. Приведены соответствующие модели. Получено удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

P. P. TROKHIMCHUCK

*Lesya Ukrainka Eastern European National University,  
Lutsk, Ukraine*

## **SOME PROBLEMS OF MODELING THE SHOCK PROCESSES OF RELAXED OPTICS**

Problems of modeling of shock processes of Relaxed Optics on the basis Okada experimental data about laser-induced creation of destruction cascade in silicon carbide are discussed. Influences of Cherenkov radiation, diffraction phenomena and light pressure at Okada data were shown. Proper models are represented. Satisfactory agreement of calculated and experimental data is received.

В экспериментах группы Окады облучение гексагонально карбида кремния 4H-SiC проводилось сфокусированными лазерными импульсами (длина волны 800 нм; длительность импульса 130 фс). Был получен каскад разрушений из пяти групп [1,2].

При моделировании процессов лазерно-индуцированных каскадов объемных разрушений в карбиде кремния полученных группой Окады [1,2] было выделено: образование каскада из пяти групп; первая группа каскада и нити пробоя в каскаде. На основании этих экспериментальных результатов можно проследить основные особенности взаимодействия лазерного излучения с объемом облучаемого материала.

Образование пяти групп в каскаде объясняется на основе дифракционного расслоения пучка при фокусировке: учитывалось пять дифракционных колец, которые фокусировались в различные точки на оптической

оси (дополнение к теории движущихся фокусов Лугового-Прохорова [3]). Это позволило определить расстояния между группами каскада.

На основе анализа первой группы каскада было сделано предположение, что образование объемных разрушений обусловлена излучением Вавилова-Черенкова [4]. Это подтверждается наличием конуса Маха для первой группы и малыми длинами филаментов. Само же появление Черенковского излучения объясняется на основе модифицированной теории Н. и О. Боров макроскопического механизма излучения Вавилова-Черенкова [5]. Роль гиперблоида Боров здесь играет гауссово распределение сфокусированного пучка. Перпендикуляры к поверхности этого распределения и дают направляющие конуса Маха [4, 5]. Известно также, что филаменты имеют широкополосный спектр излучения как и излучение Вавилова-Черенкова [6].

Число филаментов в группе определяется условиями образования оптического пробоя карбида кремния черенковским излучением.

Размеры и форма нановидов в филаментах были определены с помощью модифицированной теории Релея, в которой было использовано давление света [7, 8].

Таким образом, были промоделированы основные экспериментальные результаты группы Окады.

#### *Список литературы*

- [1] T. Okada, T. Tomita, S. Matsuo, S. Hashimoto, Y. Ishida, S. Kiyama, T. Takahashi. // Formation of periodic strain layers associated with nanovoids inside a silicon carbide single crystal induced by femtosecond laser irradiation / J. Appl. Phys., vol. 106, is. 5, 2009. – 054307 (5 pp).
- [2] Okada T., Tomita T., Matsuo S., Hashimoto S., Kashino R., Ito T. Formation of nanovoids in femtosecond laser irradiated single crystal silicon carbide. // Material Science Forum. – 2012. – Vol. 725. – P. 19 – 22.
- [3] Self-Focusing: Past and Present. Springer Series: Topics in Applied Physics, Vol. 114. / eds. R. W. Boyd, S. G. Lukishova, Y.-R. Shen. – NY: Springer Verlag, 2009. – 605 p.
- [4] Трохимчук П. П. Самофокусировка и излучение Вавилова-Черенкова. // Электроника ИНФО, №1, 2014. – С. 32-34.
- [5] Бор Н. Прохождение заряженных частиц через вещество: М.: ИЛ, 1950. – 146 с.
- [6] Чекалин С. В., Кандидов В. П. От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов. // УФН, т. 183, №2, 2013. – С. 133-152.
- [7] Trokhimchuck P. P. Problems of modeling the phase transformations in Nonlinear and Relaxed Optics (review). // Int J. Eng. Res. @ Developm. (IJERD). – 2018. – Vol.14. – Is.2. – P. 48-61.
- [8] Trokhimchuck P. P. Some problems of modeling the volume laser-induced phase transformations. / Материалы V-ой Международной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» посвященной памяти Б. В. Бокутя, 14 – 16 ноября 2018. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2018. – С.15-20.

А.А. ФРОЛОВ

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

## **ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВСТРЕЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПЛАЗМЕ**

Рассмотрено излучение терагерцовых волн при взаимодействии в разреженной плазме двух встречных лазерных импульсов с различными частотами. Исследованы спектральные, угловые и энергетические характеристики терагерцового излучения в зависимости от разности частот лазерных импульсов. Показано, что в спектре излучения к линии на удвоенной плазменной частоте [1] добавляется максимум вблизи плазменной частоты, возникающий из-за разности частот лазерных импульсов. Вычислена полная энергия терагерцового сигнала и найдено условие, при котором эмиссия на плазменной частоте превалирует. Показано, что энергия излучения на плазменной частоте максимальна, когда разность частот лазерных импульсов близка к плазменной частоте.

A.A. FROLOV

*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia*

## **THE EMISSION OF TERAHERTZ WAVES UNDER THE IN- TERACTION OF COUNTERPROPAGATING LASER PULSES IN PLASMA**

The radiation of terahertz waves is considered when two counterpropagating laser pulses with different frequencies interact in a rarefied plasma. The spectral, angular, and energy characteristics of terahertz radiation are investigated as a function of the frequency difference between laser pulses. It was shown that in the emission spectrum to the line at the doubled plasma frequency [1] a maximum near the plasma frequency is added, which arises due to the frequency difference between the laser pulses. The total energy of the terahertz signal was calculated and a condition was found under which the emission at the plasma frequency prevails. It is shown that the radiation energy at the plasma frequency is maximal when the frequency difference between laser pulses is close to the plasma frequency.

Развитая ранее теория излучения на удвоенной плазменной частоте при взаимодействии в разреженной плазме встречных лазерных импульсов с одинаковыми частотами [1] обобщается в настоящей работе на случай импульсов с отличающимися частотами. Как и в публикации [1] генерация низкочастотного электромагнитного излучения обусловлена возбу-

ждением мелкомасштабных кильватерных плазменных полей и их взаимодействием в области перекрытия лазерных импульсов. Исследована зависимость спектральных, угловых и энергетических характеристик терагерцового (ТГц) импульса от разности частот лазерных импульсов. Показано, что даже при небольшом отличии частот в спектре излучения вместе с линией на удвоенной плазменной частоте появляется максимум вблизи плазменной частоты  $\omega_p$  (рис. 1). Высота этого максимума нарастает с увеличением разности частот  $\Delta\omega$  и достигает наибольшей величины, когда разность частот совпадает с плазменной частотой.

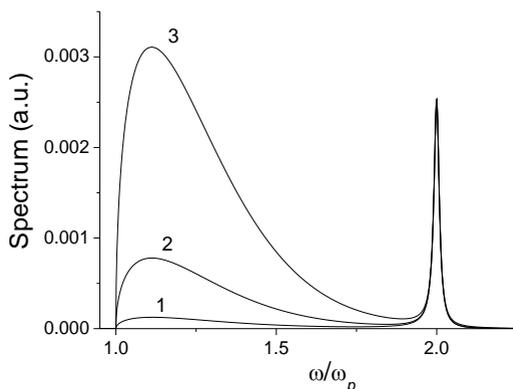


Рис. 1. Спектр ТГц излучения встречных лазерных импульсов. Кривым 1-3 соответствуют значения разности частот  $\Delta\omega/\omega_p$  равные 0.01, 0.025, 0.05.

Исследовано угловое распределение ТГц волн в условиях доминирования излучения на плазменной частоте. Показано, что при острой фокусировке лазерных импульсов излучение происходит в поперечном направлении относительно оси распространения импульсов. Увеличение размера фокального пятна импульсов приводит к тому, что излучение постепенно прижимается к оси распространения импульсов. Вычислена полная энергия ТГц импульса и найдено условие, при котором доминирует излучение на плазменной частоте. Показано, что энергия излучения на плазменной частоте максимальна, когда разность частот импульсов совпадает с плазменной частотой. Оценки показывают, что при взаимодействии встречных лазерных импульсов в разреженной плазме может происходить генерация ТГц излучения с достаточно высоким коэффициентом конверсии.

Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, В.И. ПОЛЬСКИЙ,  
П.С. ДЖУМАЕВ, К.Л. СЕРГЕЕВ, А.С. ЩЕКИН, Д. В. ПАНОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ**

В работе были проведены механические испытания на разрыв и микротвердость образцов, выращенных из порошка нержавеющей стали марки 316L при разной мощности излучения. Микроструктурный анализ объясняет полученные зависимости уменьшения прочности и увеличения пластичности при повышении мощности. Обнаружено что твердость наплавов заметно выше материала подложки соответствующего состава, это объясняется появлением в объеме наноразмерных сферических включений. Проведено исследование природы образования данных включений, их состав и влияние на свойства получаемого материала.

E.D. ISHKINYAEV, V.N. PETROVSKIY, V.I. POLSKIY,  
P.S. DZHUMAEV, K.L. SERGEEV, A.S. SCHEKIN, D.V. PANOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics  
Institute), Moscow, Russia*

### **STUDY OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STAINLESS STEEL SAMPLES, OBTAINED BY DIRECT METAL LASER DEPOSITION**

In this paper, stretching and microhardness tests were performed of samples grown from stainless steel 316L powder at different radiation powers. Microstructural analysis explains the dependences of the decrease in strength and the increase plasticity with power increasing. It was found that the hardness of the claddings is noticeably higher than the substrate material of the same composition, which is explained by the appearance of spherical nanoscale inclusions in the volume. The nature of the formation these inclusions, their composition and influence on the properties of the obtained materials are also presented in this work.

На установке Huffman HC-205, оснащенной волоконным лазером мощностью до 3.5 кВт, создавались образцы в виде лопатки для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84 и для исследования микроструктуры.

Испытания на растяжение показали, что увеличение мощности приводит к уменьшению предела прочности образцов, но увеличивает их пластичность (рис.1), однако все образцы имеют более высокие исследуемые показатели, чем литые. Анализ микроструктуры объясняет данную зависимость тем, что всегда в той или иной мере в зернах аустенита наблюдается мелкочаеистая упорядоченная микроструктура с характерным размером 2-3 мкм. С повышением мощности размеры ячеек несколько увеличиваются, и образуется хаотичная структура близкая к дендритной с большими скоростями остывания.

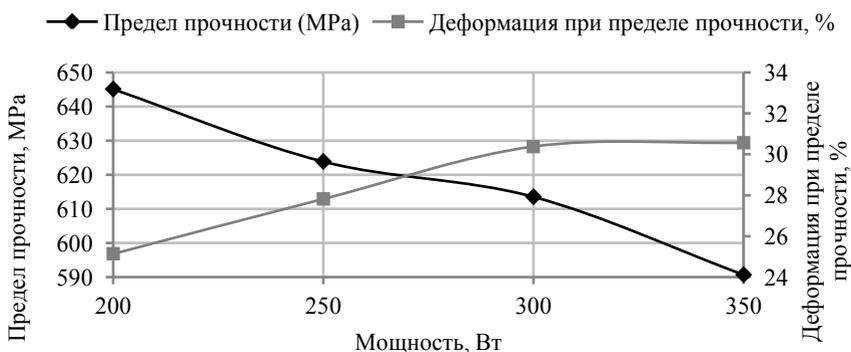


Рис. 1. Средние по всем слоям значения предела прочности и деформации в зависимости от мощности излучения.

Возникает некая неоднородность структуры по высоте образца вследствие того, что каждый слой претерпевает разное количество циклов термообработки и имеет неодинаковый теплоотвод. По мере удаления от поверхности постепенно разрушается равноосное полиэдрическое зерно аустенита. Зерна аустенита становятся вытянутыми и напоминают формирование текстуры. Это связано с более выраженным охлаждением преимущественно вдоль вертикального направления. Однако неоднородность практически не существенна при малых мощностях излучения.

Первичное окисление порошков и взаимодействие ванны расплава с воздухом приводит к образованию сложных оксидов хрома и кремния (0,2...0,3 мкм), равномерно распределенных по объему образцов. Они обладают большей твердостью по сравнению с окружающим металлом, поэтому в целом микротвердость наплавов заметно выше, чем подложки. Размеры данных сферических включений не зависят от мощности излучения и расположения по высоте детали, однако их плотность несколько выше у образцов, полученных на меньшей мощности, из-за чего они обладают большей микротвердостью ~ 4000 МПа при 200 Вт, по сравнению с ~ 3300 МПа при 350 Вт.

О.Г. ДЕВОЙНО<sup>1</sup>, А.П. ПИЛИПЧУК<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> *Белорусский национальный технический университет,*  
<sup>2</sup> *Военная академия Республики Беларусь*

## **СПОСОБ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА**

В настоящее время учет особенностей распределения интенсивности современных лазеров при математическом моделировании является сложной задачей. Для ее решения предлагается использовать представление поверхностного источника в виде многообразия сдвигов базисной функции.

O. G. DEVOINO<sup>1</sup>, A. P. PILIPCHUK<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> *Belarusian National Technical University,*  
<sup>2</sup> *Military Academy of the Republic of Belarus*

## **METHOD OF DISTRIBUTION REPRESENTATIONS INTENSITY OF LASER RADIATION WHEN MODELING THE HEATING PROCESS**

Taking into account the features of the intensity distribution of lasers in mathematical modeling is a difficult task. To solve this problem, it is proposed to use the representation of a surface source in the form of a variety of shifts of the basis function.

В лазерных технологиях инструментом воздействия на обрабатываемый материал является пучок лазерного излучения. Кроме энергетических характеристик пучка существенную роль играют его пространственные характеристики, в том числе и распределение интенсивности.

Учет характера распределения лазерного излучения по сечению лазерного пятна при оценке результата воздействия в результате решения краевой задачи аналитической теории теплопроводности является сложной задачей. В настоящее время для этого используются упрощенные представления распределения интенсивности лазерного излучения, в первую очередь аппроксимация лазерного излучения функцией равномерного распределения, или аппроксимация функцией Гаусса. Данные способы упрощения в общем случае немонотонного излучения грубо и неточно описывают реальный поток мощности и, в силу этого, не могут быть признаны адекватными.

Основной идеей решения сформулированной задачи является аналитическое представление моделей распределения интенсивности излучения немонотонного поверхностного источника в виде многообразия сдвигов базисной функции. В работах Н.Винера и А.И. Ахизера доказана возможность аппроксимации произвольной функции математической конструкцией  $W(x, N)$  вида

$$W(x, N) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot F(x - \lambda_n) \quad (1)$$

которая является линейным многообразием сдвигов  $N$  базисных функции  $F(x)$ . Данное разложение определяется векторами коэффициентов разложения  $\{A_n\}_N = \{A_1, \dots, A_N\}$  и величин соответствующих сдвигов  $\{\lambda_n\}_N = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ .

Выполнено построение аналитической модели экспериментального распределения лазерного излучения  $K(x)$  в виде совокупности сдвигов базисной функции. При этом в качестве базисной функции выбрана гауссовская функция. С использованием рассмотренного способа формализации распределения интенсивности было выполнено моделирование процесса закалки с использованием кольцевого распределения интенсивности (рис.1), при котором источник был представлен в виде суперпозиции нормально-круговых источников на квадратной сетке  $9 \times 9$  (рис.2).

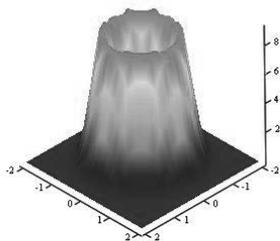


Рис. 1 – Исходное кольцевое распределение интенсивности

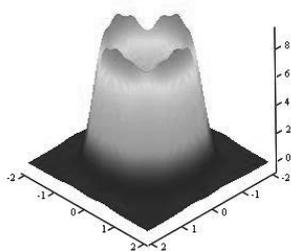


Рис. 2 – Результаты аппроксимации исходного распределения интенсивности

Температурное поле было определено по методу источников с использованием решения Н.Н. Рыкалина. Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод, что характер распределения интенсивности лазерного излучения оказывает значительное влияние на распределение температуры, что выражается в изменении глубины и формы изотермической поверхности.



# MILLAB

TECHNOLOGY

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОМПАНИИ



- Вакуумная техника: насосы, гелиевые течеискатели, вакуумные камеры, сверхвысоковакуумная арматура.
- Термообработка: печи, вакуумные шкафы.
- Испытание материалов: климатические камеры, камеры коррозии.
- Жидкостные термостаты
- Аналитика: спектрометры, хроматографы, анализаторы.
- Весь спектр оборудования для химического синтеза.



## ПРЕИМУЩЕСТВА НАШЕЙ КОМПАНИИ

- Официальный дистрибьютор
- Сертифицированная сервисная поддержка
- Бесплатное тестирование оборудования компании МИЛЛАБ на вашей установке
- Реализация технически сложных проектов, комплексные поставки
- Лучшие цены
- Склад в Москве с запасом востребованного оборудования



+7 (495) 933-71-47 [www.millab.ru](http://www.millab.ru) [info@millab.ru](mailto:info@millab.ru)

В НАЛИЧИИ НА СКЛАДЕ  
ГАРАНТИЯ 2 ГОДА

-35%



#### **TwisTorr 304 FS и IDP-7**

Для небольших систем

- Вакуум до  $1 \times 10^{-10}$  мбар.
- Производительность до 250 л/с.

#### **Новейшие технологии в турбомолекулярных насосах Agilent**

- Молекулярная ступень TwisTorr: превосходный коэффициент сжатия в том числе и лёгких газов и хорошее предельное давление.
- Технология плавающей подвески AFS: улучшенная стабильность к повышенным газовым нагрузкам.

#### **Надёжные спиральные насосы Agilent**

- Высокая производительность в своем классе.
- Увеличенный срок службы торцевых уплотнений (более пяти лет).
- Изолированные: рабочий газ не попадает в двигатель насоса.

#### **TwisTorr 704 FS/804 FS и IDP-10**

Насосы с высокой производительностью

- Вакуум до  $1 \times 10^{-10}$  мбар.
- Производительность до 660/720 л/с.

#### **Новейшие технологии в турбомолекулярных насосах Agilent**

- Технология плавающей подвески AFS: снижает нагрузку на подшипники и существенно увеличивают срок эксплуатации насоса.
- Закапсулированные подшипники на твердой консистентной смазке не загрязняют вакуум и не требуют обслуживания.

#### **Надёжные спиральные насосы Agilent**

- Герметичные: откачиваемый газ не попадает во внешнюю атмосферу.
- Изолирующий клапан защищает откачиваемую систему от разгерметизации и при внезапной остановке насоса способен закрыться



Официальный дистрибьютор Agilent — Компания МИЛЛАБ

127247, Москва, Дмитровское ш., д. 100, стр2 | бизнес-центр North House  
Т: +7 (495) 933-71-47 [www.millab.ru](http://www.millab.ru) [info@millab.ru](mailto:info@millab.ru)

