

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

**VI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
ЛАПЛАЗ-2020»**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Часть 2

Москва

УДК: 001.89 [621.373.8+533.9+539.1+530.1+620.3+519.7](06)

ББК 72+22.383

М 43

VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2020» Сборник научных трудов. Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – 370 с.

Сборник научных трудов содержит тезисы докладов, включенных в программу VI Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2020», которая прошла с 11 февраля по 14 февраля 2020 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; прикладная математика и математическое моделирование; 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.

Тезисы получены до 30 января 2020 года.

Материалы издаются в авторской редакции.

Ответственный редактор – Крупышева П.О.

ISBN 978-5-7262-2655-2

©Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2020

Программный комитет конференции

- Гаранин Сергей Григорьевич – академик РАН, директор Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ -- председатель Программного комитета
- Кузнецов Андрей Петрович – д.ф.-м.н., директор Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ – заместитель 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
- 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 – академик РАН, почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ
- Колачевский Николай Николаевич – член-корр. РАН, директор Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, заведующий кафедрой «Физико-технические проблемы метрологии»
- Кудряшов Николай Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика» НИЯУ МИФИ
- 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
- 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. – директор Института ЛаПлаз, НИЯУ МИФИ, председатель Организационного комитета
- Генисаретская С.В. – заместитель директора Института ЛаПлаз, НИЯУ МИФИ, заместитель председателя Организационного комитета
- Борисюк П.В. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ, член Организационного комитета
- Гаспарян Ю.М. — доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Городничев Е.Е. – профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Губский К.Л. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета

- Гусарова М.А. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Казиева Т.В. – старший преподаватель отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Кузнецов А.В. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Маклашова И.В. — старший преподаватель кафедры «Химическая физика» НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Масленников С.П. – профессор кафедры «Прикладная ядерная физика» НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета

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

Содержание

Секция ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	26
А.А. АНДРЕЕВ, Т.В. КАЗИЕВА, Р.Д. ГЛУХОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, В.Н. РЕШЕТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИДРОФОН ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ НИЗКИХ ЧАСТОТ	27
А.А. ХАСАН, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АТОМНЫХ ЯЧЕЕК КПН-СТАНДАРТА	29
Х.Б. АШУРОВ, М.Ш. КУРБАНОВ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ	31
К.О. БАЗАЛЕЕВА, Е.В. ЦВЕТКОВА СТРУКТУРА И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ Fe-17%Cr-12%Ni-2%Mo-0.02%C, СИНТЕЗИРОВАННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ	33
А.С. БЕЛОВ, В.Н. ПУГАЧЕВА ИНТЕРФЕРОМЕТР РАДИАЛЬНОГО СДВИГА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ АБЕРРАЦИЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	35
В.П. БИРЮКОВ, Д.В. ПАНОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, Д.В. УШАКОВ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ	37
В.П. БИРЮКОВ, Д.А. СТАРОСТИН, Д.В. КЛЕВЕТОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА МЕДНОЙ ОСНОВЕ НА СТАЛЬ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ	39
К.В. БОГДАН, А.В. ПЕНТО РАСЧЁТ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МАСС-СПЕКТРОВ	41

- Н.Д. БУХАРСКИЙ, Ю.В. КОЧЕТКОВ, Ф.А. КОРНЕЕВ, К.Л. ГУБСКИЙ, М. ЭРЕТ, Ю. АБЭ, Ф. ЛО, ДЖ.ДЖ. САНТОС, В. ОСПИНА-БОХОРКЕС, Г. ШАУМАН ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ МОЩНЫМИ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ 43**
- А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, М.И. САЗОНОВ, В.М. ХВИСЕВИЧ, Д.Л. ЦЫГАНОВ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДВИЖНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ 45**
- А.А. ГАРМАТИНА, М.М. НАЗАРОВ, М.В. ЧАЩИН, и В. М. ГОРДИЕНКО ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА АБЛЯЦИИ И ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ФИЛАМЕНТА НА ТВЕРДОТЕЛЬНУЮ МИШЕНЬ В РЕЖИМЕ ПОНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА 47**
- Р.Д. ГЛУХОВ, Т.В. КАЗИЕВА, К.Л. ГУБСКИЙ, А.П. КУЗНЕЦОВ, ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В УСТАНОВКЕ КАЛИБРОВКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ТВЕРДОМЕРОВ 49**
- В.С. ГОРЕЛИК, С.В. ПИЧКУРЕНКО, В.В. ФИЛАТОВ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ МИКРОПОЛОСТИ ГЛОБУЛЯРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА..... 51**
- Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ, Д.Б. РОГОЗКИН КОГЕРЕНТНОЕ ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ОТ СЛУЧАЙНОГО АНСАМБЛЯ МИ-ЧАСТИЦ, ПОМЕЩЕННОГО В СРЕДУ С МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ . 53**
- О.И. ГОРЧАКОВ, Л.А. ДУШИНА, Д.С. КОРНИЕНКО, А.Г. КРАВЧЕНКО, К.В. СТАРОДУБЦЕВ, В.М. ТАРАКАНОВ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛОСКОСТИ ПЯТНА ОБЛУЧЕНИЯ..... 56**
- В.Е. ГРИШКОВ, С.А. УРЮПИН ГЕНЕРАЦИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО**

СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА СТРУКТУРУ ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ 58

Е. ХУАНБАЙ., А.С. ЕРЖАНОВ, Б.А. ЖАУТИКОВ, А.А. АЙКЕЕВА ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК УВСО ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ..... 60

А.В. ИВАЩЕНКО, М.А. ТАРАСОВА ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ТИТАНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ В СРЕДЕ 62

Ш. М. ИСМАИЛОВ, В. Г. КАМЕНЕВ, Ю.Д. АРАПОВ РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННОГО И ПРОШЕДШЕГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... 64

А.Б. КЕНЕСБЕКОВ, Т.Т. РАХЫШОВ, Б.К. РАХАДИЛОВ МОДИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И СПОСОБА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ..... 66

А.В. КОЛЧИН, Д.В. ШУЛЕЙКО, С.В. ЗАБОТНОВ, Л.А. ГОЛОВАНЬ, Д.Е. ПРЕСНОВ, Т.П. КАМИНСКАЯ, С.А. КОЗЮХИН, П.И. ЛАЗАРЕНКО, П.К. КАШКАРОВ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА В АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ $Ge_2Sb_2Te_5$, ОБЛУЧЕННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ 68

Ю.В. КОЧЕТКОВ, Ф.А. КОРНЕЕВ, Т. ПИСАРЧУК, Ж.Ж. САНТОС, М. КАЛАЛ, С.Ю. ГУСЬКОВ, Т. ЧУДАКОВСКИ, А.П. КУЗНЕЦОВ ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ 70

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С ДИСПЕРСИЕЙ КАСКАДНО ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ДЛИНЫ 72

К.С. ЛУКЬЯНОВ, А.В. МИХАЙЛЮК Т.В. КАЗИЕВА, А.П. КУЗНЕЦОВ, К.Л. ГУБСКИЙ РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ

И ЛЮМИНИСЦЕНЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В КЕРАМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ АКТИВНЫХ СРЕДАХ	74
К.С. ЛУКЪЯНОВ, Т.В. КАЗИЕВА, А.П. КУЗНЕЦОВ РАЗРАБОТКА СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ	76
О.Г. ДЕВОЙНО, Н.И. ЛУЦКО, А.С. ЛАПКОВСКИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ МОД В ДВУХСЛОЙНОМ МУЛЬТИМОДАЛЬНОМ ПОКРЫТИИ, ПОЛУЧЕННОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ.....	78
П.А. ПАЛКИН, А.Б. ЛЮХТЕР, Ю.А. ЛЮТИКОВ. ФОРМИРОВАНИЕ РИСУНКА ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ГОМОГЕННЫХ СТРУКТУР ИТТЕРБИЕВЫМ ВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРОМ.....	80
А.Н. МАРЕСЕВ, С.Ф. УМАНСКАЯ, В.С. ГОРЕЛИК, А.Д. КУДРЯВЦЕВА, А.В. СКРАБАТУН, М.А. ШЕВЧЕНКО, Н.В. ЧЕРНЕГА ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В СУСПЕНЗИИ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ АЛМАЗА	82
Е.Д. МАСЛОВА, Д.С. ЧУЧЕЛОВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В АТОМАХ ЦЕЗИЯ.....	84
А.И. МИСЬКЕВИЧ , А.В. ПОДКОПАЕВ УСИЛЕНИЕ И СВЕРХСВЕТИМОСТЬ НА В-Х И С-А ПЕРЕХОДАХ ЭКСИМЕРНЫХ МОЛЕКУЛ ПРИ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКЕ	86
А.А.ГОРДЕЕВ, В.Ф.ЕФИМКОВ, И.Г.ЗУБАРЕВ, С.И.МИХАЙЛОВ О СПЕКТРЕ ВЫНУЖДЕННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАКАЧКИ СО СРЕДОЙ.....	88
А.А.ГОРДЕЕВ, В.Ф.ЕФИМКОВ, И.Г.ЗУБАРЕВ, С.И.МИХАЙЛОВ О ТОЧНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАЛЫХ ЧАСТОТНЫХ СДВИГОВ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО	90

Н.М.МУСТАФОВЕВА, А.К.ТАШАТОВ, Б.Е.УМИРЗАКОВ ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ NI_{52}/SI С ИСПОЛЬЗОВАНЫ МЕТОДОВ РЭМ И АСМ	92
К.Н. ОВЧИННИКОВ, С.А. УРЮПИН ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПЛАЗМУ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ	94
В.А. ХЛОПОНИН, Д.В. ПАНОВ, Д.В. УШАКОВ ЛАЗЕРНОЕ ДЕСТРУКТИРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	96
В.П. БИРЮКОВ, Д.В. ПАНОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, Д.В. УШАКОВ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ	98
Р.П. ПЛЕШАКОВА, А.В. ИЛЬИНСКИЙ, А.А. ИСАЕВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.А. ШИКАНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАПАЯННЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК НА БАЗЕ ДИОДОВ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ	101
О.В. РОЗОВА, В.А. СТЕПАНОВ ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫХ ПРОЦЕССОВ В БИОТКАНЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ.....	103
Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, А.В. КАЗИЕВ, М.М. ХАРЬКОВ, А.В. ТУМАРКИН, А.А. НЕДУРУБОВ, А.И. ШАЙХАЛИЕВ, Т.В. БРАЙЛОВСКАЯ ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО И ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	105
Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, А.В. ГОРШКОВА, А.В. ИВАНОВА, Д.В. ФИЛИПЧУК ПРОТОТИПИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ МИКРОФРЕЗИРОВКИ	107
Т.А. СЕМЕНОВ, Н.А. КУЗЕЧКИН, М.С. ДЖИДЖОЕВ, А.В. БАЛАКИН, К.А. ИВАНОВ, И.А. ЖВАНИЯ, В.М. ГОРДИЕНКО ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ	

РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ КЛАСТЕРНОЙ СТРУЕ	109
В.А. ГОРШКОВ; А.С. САВЕЛЬЕВ; А.С. НЕВРОВ; А.В. СМИРНОВА ФОКУСИРУЮЩИЕ АСФЕРИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ МЕГАДЖОУЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....	112
В.П. БИРЮКОВ, Д.А. СТАРОСТИН, Д.В. КЛЕВЕТОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА МЕДНОЙ ОСНОВЕ НА СТАЛЬ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ.....	114
М. А. ТАРАСОВА, Д. А. КОЧУЕВ, К.С. ХОРЬКОВ, В.Г. ПРОКОШЕВ, А. В. ИВАЩЕНКО ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ.....	116
Ю.М. АЛИЕВ, А.А. ФРОЛОВ ВОЗБУЖДЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ МОД В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДВУХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	118
И.А. ХРИСАНОВ, Ю.А. САТОВ, А.В. ШУМШУРОВ, А.А. ЛОСЕВ РАЗРАБОТКА СО₂-ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНО- ПЛАЗМЕННОГО ГЕНЕРАТОРА ПУЧКА ИОНОВ.....	120
В.В. ШАРОГЛАЗОВА, Р.А. ШАХОВОЙ, А.В. УДАЛЬЦОВ, Ю.В. КУРОЧКИН СТОХАСТИЧЕСКИЕ СКОРОСТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ УРАВНЕНИЯ В КОНТЕКСТЕ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ	122
П.В. ШАХОВ, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Д.А. ЗАЗЫМКИНА, С.И. КУДРЯШОВ, Э. Р. ТОЛОРДАВА, А.А. ИОНИН, А.А. РУДЕНКО, Д.А. ЗАЯРНЫЙ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КОЛЛОИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ.....	124
А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, И. Н. ШИГАНОВ, С.А. КОТОВ ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ МНОГОПРОХОДНОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ.....	126

**И.А. ЩУКАРЕВ, Д.А. КОРОБКО, М.Ю. САЛГАНСКИЙ,
И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, П.П. МИРОНОВ ГЕНЕРАЦИЯ
ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКОННЫХ
УСИЛИТЕЛЯХ 128**

**Секция ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ..... 130**

**Д.Г. АГЕЙЧЕНКОВ, А.В. КАЗИЕВ, Д.В. КОЛОДКО СЕРГЕЕВ Н.С.
СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ AZO
ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ НА СТЕКЛЯННЫЕ ПОДЛОЖКИ В
СТАЦИОНАРНОМ, ВЫСОКОЧАСТОТНОМ И БИПОЛЯРНОМ
РЕЖИМАХ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА 131**

**Н.С. АХМАДУЛЛИНА, Н.Н. СКВОРЦОВА, Е.А. ОБРАЗЦОВА, В.Д.
СТЕПАХИН Е.М. КОНЧЕКОВ, Ю.Ф. КАРГИН, А.А. КОНОВАЛОВ,
О.Н. ШИШИЛОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В
СМЕСЯХ ПОРОШКОВ «МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКОЕ
ВЕЩЕСТВО» И «МЕТАЛЛ-НЕОРГАНИЧЕСКАЯ СОЛЬ»,
ИНИЦИИРУЕМЫЕ ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ГИРОТРОНА 133**

**О.А. БАШУТИН, Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ, П.П. СИДОРОВ
ИЗУЧЕНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ
ИСКРЫ 135**

**Н.Н. БОГАЧЕВ, Н.Г. ГУСЕЙН-ЗАДЕ, И.В. ЖЛУКТОВА,
С.Ю. КАЗАНЦЕВ, В.А. КАМЫНИН, С.В. ПОДЛЕСНЫХ,
С.А. ФИЛАТОВА, Д.В. ШОХРИН ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ
ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ АНТЕНН..... 137**

**К.Ю. ВАГИН, С.А. УРЮПИН ВОЛНЫ И НЕУСТОЙЧИВЫЕ МОДЫ
В ПЛАЗМЕ, ОБРАЗОВАННОЙ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ
ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА 139**

**Е.В. ВОРОНОВА, В.Д. БОРЗОСЕКОВ Н.Н. СКВОРЦОВА
ЭРГОДИЧНОСТЬ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛАЗМЫ ПРИ
МНОГОИМПУЛЬСНОМ ЭЦР НАГРЕВЕ В СТЕЛЛАТОРЕ Л-2М
..... 141**

А.Я.ДЗЮБЛИК, Б.Е.ГРИНЮК РОЛЬ ЭЛЕКТРОННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ.....	143
И.С. ЕРЕМИН, Д.Д. БЕРНТ, А.А. ПИСАРЕВ ВЛИЯНИЕ ЗАХВАТА ВЛАГИ НА ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ КАЧЕСТВА ОКСИДОВ СТАННАТА ЦИНКА В СОСТАВЕ НИЗКОЭМИССИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДАЕМЫХ НА СТЕКЛО ИЗ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА.....	145
А.А. ИСАЕВ УСКОРЕНИЕ НУКЛИДОВ ВОДОРОДА В МАЛОГАБАРИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВАКУУМНЫХ УСТРОЙСТВАХ СО СКРЕЩЕННЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ.....	154
Г.Г. ДОЛЬНИКОВ, А.А. КАРТАШЕВА, А.С. БЫЧКОВА, И.А. ШАШКОВА, И. А. КУЗНЕЦОВ, А.Н. ЛЯШ, А. Е. ДУБОВ, В. А. ГРУШИН, С.А. БЕДНЯКОВ, С.И ПОПЕЛЬ, А.В. ЗАХАРОВ. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ.....	149
Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ	151
Д.В. МАЛАХОВ, С.П. КОНЮХОВА, Е.М. КОНЧЕКОВ, Л.В. КОЛИК, Н.Н. СКВОРЦОВА ГЕНЕРАТОР НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРА.....	153
Е.Д. МАРЕНКОВ, А.А. ПШЕНОВ ЭКРАНИРОВАНИЕ ЛИТИЕВОЙ МИШЕНИ В ПЛАЗМЕ ЛИНЕЙНЫХ УСТАНОВОК	155
Г.М. БАТАНОВ, В.Д. БОРЗОСЕКОВ, Д.Г. ВАСИЛЬКОВ, И.Ю. ВАФИН, С.Е. ГРЕБЕНЩИКОВ, И.А. ГРИШИНА, А.А. ЛЕТУНОВ, В.П. ЛОГВИНЕНКО, А.И. МЕЩЕРЯКОВ, М.Н. ПЕТРОВА, А.А. ПРОКУДИНА, В.Д. СТЕПАХИН, Н.К. ХАРЧЕВ, Ю.В. ХОЛЬНОВ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА СТЕЛЛАТОРЕ Л-2М	157

В.В.РАДЕНКО, А.А.ПРИВАЛОВ, А.В.РАДЕНКО, В.Б.СВИРКОВ, А.В.ГУРСКАЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИОННОГО И ПЛАЗМЕННОГО МНОГОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕННОМ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЕ	159
А.В.ПУЛИШ, Д.В. МАЛАХОВ О.И. МИЛОКОСТ, Н.Н. СКВОРЦОВА, Н.Г. ГУСЕЙН-ЗАДЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННО-АКТИВИРОВАННОЙ СРЕДЫ НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ КЛЕТОЧНОЙ ЛИНИИ HELA	161
А.А. ПШЕНОВ, А.С. КУКУШКИН ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОКНА РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА Т-15	163
А.А.ДРОЗДОВСКИЙ, П.В.САСОРОВ, А.В.БОГДАНОВ, Р.О.ГАВРИЛИН, С.А.ДРОЗДОВСКИЙ, А.В.КАНЦЫРЕВ, М.А. КАРПОВ, В.А.ПАНЮШКИН, И.В.РУДСКОЙ, С.М.САВИН ИССЛЕДОВАНИЕ Z-ПИНЧА С ИНИЦИАЦИЕЙ РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ.....	165
В.В.РАДЕНКО, А.В.РАДЕНКО, В.Б.СВИРКОВ, А.В.ГУРСКАЯ РАЗРАБОТКА ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ К	167
Н.Н. СКВОРЦОВА, С.А.МАЙОРОВ, Д.В. МАЛАХОВ, В.Д. СТЕПАХИН, Е.А. ОБРАЗЦОВА О.Н. ШИШИЛОВ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ НАД ПОРОШКОМ РЕГОЛИТА ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА	169
Д.С. СТЕПАНОВ, А.П. СКРИПНИК, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ЭМИТТЕРА ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ЛЕГКИХ ИОНОВ ПЕННИНГА НА ИЗВЛЕКАЕМЫЙ ТОК	171
Н.А. СМОЛАНОВ ФРАКТАЛЫ ИЗ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА: ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА	173
А.С. СОКОЛОВ, Д.В. МАЛАХОВ, В.Д. СТЕПАХИН, Н.Н. СКВОРЦОВА АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ГИРОТРОНОМ	175

**А.А. СТЕПАНЕНКО СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПЛАЗМЫ И СКИН-
ЭФФЕКТА НА ДИНАМИКУ БЛОБОВ НА ПЕРИФЕРИИ
ТОКАМАКА..... 177**

**Д.С. СТЕПАНОВ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА
МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ В СВЧ РАЗРЯДЕ В РЕЖИМЕ ЭЦР
..... 179**

**Е.Д. КАЗАКОВ, Ю. Г. КАЛИНИН , Д.И. КРУТИКОВ, А.А. КУРИЛО,
М.Ю. ОРЛОВ, М.Г. СТРИЖАКОВ, С.И. ТКАЧЕНКО, А.Ю. ШАШКОВ
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕНЕВЫМИ МЕТОДАМИ ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ
ПУЧКОВ С ПОЛИМЕРНЫМИ МИШЕНЯМИ В ДИОДЕ
СИЛЬНОТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ..... 181**

**Н.С. СУХАНОВ, К.А. ИВАНОВ, И.М. ГАВРИЛИН, Ю.В. КАРГИНА,
Ю.В. НАЗАРКИНА, И.В. БОЖЬЕВ, Р.В. ВОЛКОВ, С.А. ГАВРИЛОВ,
А.Б. САВЕЛЬЕВ-ТРОФИМОВ ОСОБЕННОСТИ УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ГЕНЕРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО И
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКОМ
ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ
МИШЕНИ 183**

**А.Б. ТАЖЕН, М.К. ДОСБОЛАЕВ, Ж.Р. РАЙЫМХАНОВ, Т.С.
РАМАЗАНОВ, ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННОГО
ПОТОКА В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ 185**

**Ж.Р. РАЙЫМХАНОВ, М.К. ДОСБОЛАЕВ, А.Б. ТАЖЕН, М.Е.
ПШИКОВ СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ИМПУЛЬСНОГО
ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА 187**

**В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ, С.А. МАЙОРОВ, Г.Б. РАГИМХАНОВ, З.Р.
ХАЛИКОВА О ВЛИЯНИИ МАЛЫХ ПРИМЕСЕЙ МЕТАЛЛА НА
ИОНИЗАЦИОННО-ДРЕЙФОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОНА В ИНЕРТНОМ ГАЗЕ 189**

**В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ, С.А. МАЙОРОВ Г.Б. РАГИМХАНОВ, З.Р.
ХАЛИКОВА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕЙФА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ**

ИОНОВ В КСЕНОНЕ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	191
Н.С. СЕРГЕЕВ, А.В. КАЗИЕВ, Д.Г. АГЕЙЧЕНКОВ Д.В. КОЛОДКО ОСАЖДЕНИЕ ОКСИДОВ НИКЕЛЯ И ВОЛЬФРАМА В ИМПУЛЬСНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА	193
Р.А. ЯХИН, С.Ю. ГУСЬКОВ, Н.Н. ДЕМЧЕНКО, Н.В. ЗМИТРЕНКО, П.А. КУЧУГОВ СЖАТИЕ И ГОРЕНИЕ МИШЕНЕЙ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В УСЛОВИЯХ ЗАЖИГАНИЯ СХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ	195
Р.И. ХУСНУТДИНОВ, В.С. НЕВЕРОВ, Е.А. ВЕЩЕВ, А.Б. КУКУШКИН А.Р. ПОЛЕВОЙ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОГО ПРОФИЛЯ СВЕТИМОСТИ $D\alpha$ В ПРИСТЕНОЧНОМ СЛОЕ И ДИВЕРТОРЕ ИТЭР В РАМКАХ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДХОДА МАТРИЦ ПЕРЕНОСА ЛУЧЕЙ	197
В.В. КУЗЕНОВ, А.О. ДОБРЫНИНА, А.В. СТАРОСТИН, В.В. ШУМАЕВ ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ МИШЕНЬ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ	199
А.Е. ШИКАНОВ МОДЕЛЬ СФЕРИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ИОННОГО ДИОДА С ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ АНОДОМ	201
К.Ю. ВАГИН, Т.В. МАМОНТОВА, С.А. УРЮПИН ПРОНИКНОВЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМУ, ОБРАЗОВАННУЮ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ ГАЗА	203
А.С. ПОЛЮХИН ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР И ПЛОТНОСТЕЙ	205
А.М. ЖУКЕШОВ, Б.М. ИБРАЕВ, М.И. ПШИКОВ РАЗРАБОТКА ПЛАЗМЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	207

А.М. ЖУКЕШОВ, Б.М. ИБРАЕВ, М.И. ПШИКОВ МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ УСКОРИТЕЛЯМИ.....	209
Е.Д. ВОВЧЕНКО, О.В. ДЕРЯБОЧКИН, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.Е. ШИКАНОВ, МАЛОГАБАРИТНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ КОРОТКИХ ПАКЕТОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НУКЛИДОВ ВОДОРОДА.....	211
А.М. БУЛЫГИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, О.В. ДЕРЯБОЧКИН, А.Р. КАРИМОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.Е. ШИКАНОВ ПРОЕКТ МАЛОГАБАРИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПЛАЗМЫ.....	213
А.С. ВОРОНОВ, И.Д. ЕГОРОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКЕ.....	216
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.Е. ЕВСИН МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ПУТЕМ СООСАЖДЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ	218
А.Е. ЕВСИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, Э.М. ГЛАГОВСКИЙ, А.Н. ВОЙТЮК, А.М. ЗАХАРОВ, Я.А. САДОВСКИЙ НАПРАВЛЕННОЕ ОСАЖДЕНИЯ ПАРОВ МЕТАЛЛОВ КАК МЕТОД УСКОРЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ АМОРФНОГО СЛОЯ КОМПОНЕНТОВ ВТСП-2	220
А.Е. ЕВСИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, Г.П. ТИМКОВСКИЙ, И.Д. ЖДАНОВ ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ОКСИДИРОВАНИЯ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ	222
А. С. МАРТЫНЕНКО, С. А. ПИКУЗ, С. Н. РЯЗАНЦЕВ, И. Ю. СКОБЕЛЕВ, К. Д. БАИРД, Н. БУЗС, Н. ВУСЛИ, Л. ДОЭЛЬ, Ф. ДЮРЕЙ, Р. КОДАМА, К. ЛАНКАСТЕР, П. МАК КЕНА, К. Д. МЁРФИ, Т. А. ПИКУЗ К. СПИНДЛО, А. Я. ФАЕНОВ, Д. ФАРЛИ ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ПЛАСТИКОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ПЛОТНОСТЬ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗОВАННОЙ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИШЕНЯХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ СВЕРХКОНТРАСТНЫМИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	224

В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ, О.А. ОМАРОВ, Г.Б. РАГИМХАНОВ, З.Р. ХАЛИКОВА, Д.В.ТЕРЕШОНОК ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ГЕЛИИ	226
В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ, Г.Б. РАГИМХАНОВ, З.Р. ХАЛИКОВА, Д.В.ТЕРЕШОНОК ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ ГАЗА.....	228
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, М.Х. ГАДЖИЕВ, Н.А. ДЕМИРОВ Г.Б. РАГИМХАНОВ, З.Р. ХАЛИКОВА ПРОВОДИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ С ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ..	230
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ, Б.Р. КАХРАМОНОВ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	232
В.Н. АРУСТАМОВ, Р.Х. АШУРОВ, В.М. РОТШТЕЙН, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ. К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	234
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ, Б.Р. КАХРАМОНОВ К ВОПРОСУ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА.....	236
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ, Б.Р. КАХРАМОНОВ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИОНАМИ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА.....	238
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ., ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАТОДА НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КАТОДНОЙ ОБЛАСТИ ВАКУУМНОЙ ДУГИ.....	240
И.В.ВИЗГАЛОВ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ	242
А.Б. ЛЯШЕНКО, А.А. ПШЕНОВ, А.А. СТЕПАНЕНКО УЧЁТ ГЕОМЕТРИИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА ПРИ СОЗДАНИИ	

РАСЧЁТНЫХ СЕТОК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ БЛОБОВ В КОДЕ VOUT++ 244

К.В. САФРОНОВ, В.А. ФЛЕГЕНТОВ, С.А. ГОРОХОВ, Д.С. ГАВРИЛОВ, С.Ф. КОВАЛЕВА, А.С. ТИЩЕНКО, Д.О. ЗАМУРАЕВ, А.Л. ШАМРАЕВ, Е.С. МОКИЧЕВА, А.В. ПОТАПОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТРАСТА 100 ТВт ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЯРКОСТИ ЗЕРКАЛЬНО ОТРАЖЕННОГО ОТ МИШЕНИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... 246

Секция УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 247

М.М. ЗОБОВ УЧАСТИЕ LNF INFN В ПРОЕКТЕ CREMLIN+ 248

Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ ОСОБЕННОСТИ “QUASI-FROZEN SPIN” КОНЦЕПЦИИ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ДЛЯ ПОИСКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ДЕЙТРОНА..... 249

Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ ПОИСК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ДЕЙТРОНА В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ 253

А.Е. АКСЕНТЬЕВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ КРИТЕРИИ УСПЕШНОСТИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭДМ В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ С “ЗАМОРОЖЕННЫМ СПИНОМ” 256

А.А. ЗАВАДЦЕВ, Д.А. ЗАВАДЦЕВ, О.А. ПЕРЕВОЗЧИКОВА, Д.В. ЧУРАНОВ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ КЛИСТРОНА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОПЕРЕЧНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ XFEL..... 259

А.П. ДУРКИН, А.А. КОЛОМИЕЦ, В.В.ПАРАМОНОВ- ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НА ФОКУСИРОВКУ ПРОТОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ В УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ НА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ..... 261

В.В.ПАРАМОНОВ ОСОБЕННОСТЬ ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ “ЗАМКНУТОЕ КОЛЬЦО”	263
Н.П. БОБЫРЬ, Е.Д. КАЗАКОВ, Д.И. КРУТИКОВ, А.А. КУРИЛО, М.Ю. ОРЛОВ, А.В. СПИЦЫН, М.Г. СТРИЖАКОВ ПИЛОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОЩНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА УСКОРИТЕЛЕ «КАЛЬМАР»	265
С.Н.АНДРИАНОВ МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЯХ	267
П.А. ФЕДИН А.В. ЗИЯТДИНОВА, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, Р.П. КУЙБИДА, А.А. НИКИТИН, С.В. РОГОЖКИН Т.В. КУЛЕВОЙ ТРЕБОВАНИЯ К КОМБИНИРОВАННОМУ ПУЧКУ Fe + n/He НА УСКОРИТЕЛЕ ТИПР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	269
Р.П. ПЛЕШАКОВА, А.В. ИЛЬИНСКИЙ, А.А. ИСАЕВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.А. ШИКАНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАПАЯННЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК НА БАЗЕ ДИОДОВ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ	271
Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.Р. КАРИМОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, М.И. ЛИСОВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ, А.Е. ШИКАНОВ РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ИОННОМ ДИОДЕ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ	273
В.П. ЕФРЕМОВ, А.Д. КИВЕРИН, И.С. ЯКОВЕНКО, Е.Г. БАЛДИНА, А.А. БАЛДИН, В.В. БЛЕКО МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БОЛЬШОЙ УРАНОВОЙ МИШЕНИ «БУРАН» ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПРОТОНОВ	275
М.А. ГУЗОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, А.И. МАКАРОВ ДИНАМИКА И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ	

КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ, РАБОТАЮЩЕГО НА ЧАСТОТЕ 81,25 МГц	277
Р.Д. ФАТКУЛЛИН, Д. Н. СЕЛЕЗНЁВ, А. И. СЕМЕННИКОВ, С. Л. БОГОМОЛОВ, Т. В. КУЛЕВОЙ КОМПАКТНЫЙ ЭЦР ИОННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ УСТАНОВКИ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	278
В.А. ФЛЕГЕНТОВ, К.В. САФРОНОВ, С.А. ГОРОХОВ, А.С. ТИЩЕНКО, Д.О. ЗАМУРАЕВ, А.Л. ШАМРАЕВ, С.Ф. КОВАЛЕВА, Д.С. ГАВРИЛОВ, Я.В. ЛОСЕВ, А.В. ИВАНУШКИН, К.Ю. КУСТАРЕВ, В.В. МЕНЬШЕНИН, А.В. ПОТАПОВ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	280
И.А.АШАНИН, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СИБИРЬ-2»	282
В.С. ДЮБКОВ, В.Ю. МЕХАНИКОВА МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ БЕЗДИСПЕРСНЫЙ ПОВОРОТНЫЙ КАНАЛ ИОНОВ УРАНА ДЛЯ ПРОЕКТА DERICA	284
К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, П.А. ФЕДИН, Р.П. КУЙБИДА, Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА Т.В. КУЛЕВОЙ ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ВОЛЬФРАМА И ЖЕЛЕЗА НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР	286
КАРИМОВ А.Р., БУЛЫГИН А.М., ШИКАНОВ А.Е., КОЗЛОВСКИЙ К.И., ДЕРЯБОЧКИН О.В., ТЕРЕХОВ С.А. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ	288
В.А. ВОРОНЦОВ МНОГФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЦИКЛОТРОН ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ	290
В.А. ВОРОНЦОВ О ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ	292

А.А. ЗАВАДЦЕВ, Д.А.ЗАВАДЦЕВ, О.А.ПЕРЕВОЗЧИКОВА, Д.В.ЧУРАНОВ	БИПЕРИОДИЧЕСКИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ RING	294
Н.А. КЛЕОПОВА	ПРИМЕНЕНИЕ ДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	298
А.А. ЛОСЕВ, Ю.А. САТОВ, И.А. ХРИСАНОВ, А.А. ВАСИЛЬЕВ, А.Н. БАЛАБАЕВ, А.В. ШУМШУРОВ	ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКЦИОННОЙ СЕТКИ НА ИОННЫЙ ПУЧОК В ЛАЗЕРНОМ ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ	300
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ	СИСТЕМА ПИТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ С СЕКЦИЯМИ НА СТОЯЧЕЙ И БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ	304
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ	АНАЛИЗ ДОПУСКОВ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ И РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ ГИБРИДНОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ	306
Р.Е. НЕМЧЕНКО, М.А. ГУСАРОВА	РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПОЛУВОЛНОВОГО РЕЗОНАТОРА	308
В.В.РАДЕНКО, В.Б.СВИРКОВ, М.В.ДОЛГОПОЛОВ	ЭЛЕКТРОННО-УПРАВЛЯЕМЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ СИНТЕЗ-ГЕНЕРАТОР НЕЙТРОНОВ	310
В.В.РАДЕНКО, В.И.ЧЕПУРНОВ, А.В.ГУРСКАЯ, М.В.ДОЛГОПОЛОВ	МАГНИТООПТОДИНАМИЧЕСКАЯ КАМЕРА СИНТЕЗА	312
Н.Е. РОЗАНОВ	ПРИКЛАДНЫЕ РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТОЙ, ЧАСТЬ ВТОРАЯ	314
И.В. РЫБАКОВ, В.В. ПАРАМОНОВ	ОПТИМИЗАЦИЯ УЗЛА СОГЛАСОВАНИЯ СЕКЦИИ РЕЗОНАТОРА CDS И МОСТОВОГО УСТРОЙСТВА	316

**В.М. СКОРКИН НЕЙТРОННЫЙ МОНИТОРИНГ
ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ПРОТОНОВ..... 318**

**М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, М.И. ЖИГАЙЛОВА, Д.Е. РОНИН,
В.В. ТЕЛЯТОВ ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КОМПАУНДА
ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В
ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
..... 320**

**А.С. БОГОМОЛОВ, Т.С. БАКИРОВ, П.К. БОГДАНОВ О ЛИНЕЙНОМ
УСКОРИТЕЛЕ ПРОТОНОВ НА ОБРАТНОЙ ВОЛНЕ (УЛОВ) 322**

**Секция ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ..... 324**

**И.Н. АБАЛАКИН, Е.В. РЯБЕВА В.Т. САМОСАДНЫЙ, А.В. СУМИН
МНОГОКАНАЛЬНЫЙ КЛИНИЧЕСКИЙ ДОЗИМЕТР ДЛЯ
СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ В ЗОНАХ
МЕДИЦИНСКОГО ИНТЕРЕСА – ОПУХОЛЯХ И ОРГАНАХ
РИСКА 325**

**А.Г. АМУРСКИЙ, М.В. РЕВЯКИН, Е.М. ТЮРИН МОНИТОР
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ СКВАЖИННОГО ГЕНЕРАТОРА С
ГАЗОНАПОЛНЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКОЙ 327**

**А.В. БОЙКО, В.П. КИРЕЕВ, В.Г. КОВАЛЕНКО, С.А. КОРНИЕВСКИЙ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В
ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ДОЗИМЕТРИИ 329**

**С.В. ГАВРИШ, В.В. ЛОГИНОВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, С.В. ПУЧНИНА
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧЕК
ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ 331**

**А.П. ДЕНИСЕНКО, Я.А. КОКОРЕВ, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО
ГЕНЕРАТОРА НАБОРОМ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ 333**

**В.И. ЗВЕРЕВ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА
ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД НЕЙТРОННО-РАДИАЦИОННЫМИ
МЕТОДАМИ..... 335**

Р.Ф. ИБРАГИМОВ, П.В. ПОНОМАРЕВА, Е.В. РЯБЕВА, Е.М. ТЮРИН, И.В. УРУПА. МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ОТ 0,1 ДО 15 МЭВ ПО ОТКЛИКАМ ДЕТЕКТОРА С АЛМАЗНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ	337
С.В. КУЗНЕЦОВ, В.В. КАДИЛИН, Н.В. БОЙКО, А.В. ШУСТОВ. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ	339
И.М. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ, А.С. ПОЛИВИН. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА ПЕННИНГА В МАЛОГАБАРИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ИОНОВ	341
Н.В. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ А.А. СОЛОДОВНИКОВ, Д.И. ЮРКОВ. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО ПЕННИНГОВСКОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА В ПЕРЕХОДНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЯ	343
И.С. МАСЛЕННИКОВА, Г.И. ЗЕБРЕВ. ИСПЫТАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ	345
С.П. МОРЕВ, А.Н. ДАРМАЕВ, К.В. КУЗЬМИЧ, Э.К. МУРАВЬЕВ, В.М. САБЛИН. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУШКИ С КРУПНОСТРУКТУРНЫМИ ИГОЛЬЧАТЫМИ АВТОЭМИССИОННЫМИ ЯЧЕЙКАМИ: РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ	347
Г.В. ПОЛЁТОВ. ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ БЕЗ ОХРАННОГО ЭЛЕКТРОДА	349
П.В. ПОНОМАРЕВА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА, Е.М. ТЮРИН, И.В. УРУПА. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ТИХОНОВА В ЗАДАЧЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ ДЛЯ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА	351
М.В. ПРОКУРОНОВ, В.Д. СЕВАСТЬЯНОВ, О.И. ФОМИН, Р.М. ШИБАЕВ, А.В. ЯНУШЕВИЧ. ПОСТРОЕНИЕ ИНТРОСКОПОВ С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ	

ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СМЕШАННОГО БЫСТРОГО НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ.....	353
Д.Ю. ПУГАЧЕВ ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА РАЗРЯДНЫЕ САПФИРОВЫЕ ОБОЛОЧКИ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ	355
А.М. СКОТНИКОВ, С.В. КОЛЕСНИКОВ ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ARDUINO ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СБОРА ДАННЫХ ОТ МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ.....	357
И.В. УРУПА, Е.Э. ЛУПАРЬ, А.В. СКОТНИКОВА, В.В. КАДИЛИН, Е.В. РЯБЕВА КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА EJ-276 ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗДЕЛЕНИЮ СМЕШАННЫХ ГАММА-НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ	359
И.В. УРУПА, Е.Э. ЛУПАРЬ, В.В. КАДИЛИН, Е.В. РЯБЕВА РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕШАННЫХ ГАММА-НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ ДЕТЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА.....	361
А.Н. ШАБРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ СКВАЖИННОГО ПРИБОРА ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ГАММА-КАРОТАЖА СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО (ИНГК-С).....	363
К.А. ШАРОВ, Е.В. РЯБЕВА, В.В. КАДИЛИН, А.Е. ШУСТОВ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ	365
А.Е. ШУСТОВ, А.И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, К.Ф. ВЛАСИК, В.В. КАДИЛИН, З.М. УТЕШЕВ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТКЛИКА ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ.....	367
А.Е. ШУСТОВ, К.Ф. ВЛАСИК, В.В. КАДИЛИН, З.М. УТЕШЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ПРОТОТИПА МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ	369

Секция
ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Руководитель секции – зам. зав. кафедры 37,
Петровский Виктор
Николаевич

Секретарь секции – доцент кафедры 37
Губский Константин
Леонидович

Тел.:8 (495)788-56-99, доб.8376

Факс: (495)324-97-55

E-mail: klgubskiy@mephi.ru

А.А. АНДРЕЕВ, Т.В. КАЗИЕВА, Р.Д. ГЛУХОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, В.Н.
РЕШЕТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИДРОФОН ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ НИЗКИХ ЧАСТОТ

Разработан и изготовлен прототип волоконно-оптического гидрофона на основе гетеродинного интерферометра. Чувствительная часть гидрофона выполнена в виде двух вложенных катушек длиной 200 мм. Проведены экспериментальные исследования его чувствительности.

A.A. ANDREEV, T.V. KAZIEVA, R.D. GLUKHOV, K.L. GUBSKIY,
V.N. RESHETOV

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

DEVELOPMENT OF FIBER OPTICAL HYDROPHONES

A prototype of a fiber-optic hydrophone based on a heterodyne interferometer was made and developed. The sensitive part of the hydrophone is two putted inside coils length is 200 mm. Experimental studies of its sensitivity have been carried out.

Волоконно-оптические датчики активно разрабатываются для гидроакустических систем различного назначения: как в военных целях – для морских систем охраны периметра и гидроакустических антенн, так и для гражданского применения - для геофизической разведки полезных ископаемых на морском шельфе с применением донных сейсмических станций и морских кос.

Существует ряд преимуществ волоконно-оптических датчиков над традиционными (пьезоэлектрическими и ёмкостными) – они обладают высокой чувствительностью, большим динамическим диапазоном, коррозионной стойкостью, не чувствительны к электромагнитному и радиационному воздействию, легко мультиплексируются, а также имеют малый вес и объем. Кроме того, чувствительные элементы гидроакустических систем, выполненные на основе волоконно-оптических технологий, как правило, полностью пассивны и не требуют подведения электрического питания [1].

Практически все современные волоконно-оптические датчики гидроакустического давления являются датчиками интерференционного типа [2]. Использование интерферометрических методов регистрации гидроакустического давления обусловлено их высокой чувствительностью. В основном используются интерференционные схемы типа Маха-Цендера, Майкельсона, Фабри-Перо и на брэгговских решётках.

Для прототипа волоконно-оптического гидрофона была выбрана гетеродинная схема интерферометра Маха-Цендера. Данная схема при использовании прецизионного фазометра способна обеспечить регистрацию сигналов в диапазоне низких звуковых частот и инфразвука в присутствии помех и значительных вариациях внешних условий.

Чувствительная часть гидрофона состоит из двух оптоволоконных катушек, одна из которых является опорной, а другая чувствительной. Чувствительная обмотка покрыта полиуретаном и является восприимчивой к внешнему воздействию, а опорная обмотка находится внутри чувствительной и развязана от стенок для предотвращения воздействия на неё внешних вибраций. Чувствительный элемент был выполнен в виде цилиндра длиной 200 мм и диаметром 60 мм. Длина волокна в чувствительной катушке составляет 42 м.

Методом ступенчатого изменения давления была измерена чувствительность данного прототипа гидрофона. Она составила 0,06 рад/Па.

Список литературы

1. Shizhuo Y. Fiber Optic Sensors/ Y. Shizhuo, P. B. Ruffin, T. S. Francis. – 2nd Edition. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. –494 p.
2. Lee H.B., Kim Y. H., Park K. S., Eom J. B., Kim M. J., Rho B. S., Choi H. Y. Interferometric Fiber Optic Sensors// Sensors. –2012. –V.12. P.2467-2486.

А.А. ХАСАН¹, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ², Д.С. ЧУЧЕЛОВ²,
В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АТОМНЫХ ЯЧЕЕК КПН-СТАНДАРТА

Для повышения стабильности атомных часов на резонансе когерентного пленения населенностей (КПН) требуется подавлять температурную зависимость его частоты и увеличивать отношение контраста резонанса к его ширине. Определены коэффициенты зависимости частоты КПН резонанса от температуры буферных газов. Для оптимизации отношения контраста к ширине найдено требуемое суммарное давление буферных газов ($Ar + N_2$) для малогабаритных ячеек.

A.A. HASAN¹, M.I. VASKOVSKAYA², D.S. CHUCHELOV²,
V.L. VELICHANSKY^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
115409, Moscow, Russia

²P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

OPTIMIZATION ATOMIC CELLS CHARACTERISTICS OF THE CPT STANDARD

To increase the stability of atomic clock based on the resonance of coherent population trapping (CPT) it is necessary to suppress the temperature dependence of its frequency and increase the ratio of the resonance contrast to its width. The temperature coefficients of the buffer gas were determined. We optimized the ratio of the CPT resonance contrast to its width by determining the required total pressure of buffer gases of small-size cells.

В стандартах частоты на основе когерентного пленения населенностей (КПН) [1] используются пары щелочных металлов в стеклянных ячейках. Для предотвращения частых соударений со стенкой в ячейки напускают буферный газ (БГ), а для уменьшения температурной зависимости частоты КПН-резонанса – смесь БГ. Для определения ее состава, необходимо знать коэффициенты β , δ , зависимости [2]

$$\Delta\nu(T) = P_0 * (\beta + \delta * (T - T_0) + \gamma * (T - T_0)^2),$$
 где $\Delta\nu = (\nu_{\text{кпн1БГ}} - \nu_{\text{кпн-2БГ}})$

Для их нахождения использовались калибровочные ячейки, в которых содержится ^{87}Rb и только один буферный газ (Ar , N_2), произведенные стеклодувным способом, обеспечивающим большую точность наполнения. В данной работе были определены значения коэффициентов:

$\beta(\text{Ar})=-64$ Гц/Торр, $\beta(\text{N}_2)=560$ Гц/Торр, $\delta(\text{Ar})=-0.37$ Гц/К/Торр, $\delta(\text{N}_2)=0.61$ Гц/К/Торр, относительная погрешность не более 4%. По найденным коэффициентам, можно оценить реальное давление в ячейке со смесью буферных газов ($\text{Ar}+\text{N}_2$), используя частоту КПН-резонанса при некоторой температуре T_0 (60°C) и температурную зависимость этой частоты (Рис.1а). Это позволяет определить и парциальные давления БГ, и их сумму. Отметим, что в малогабаритных, не имеющих штенгеля

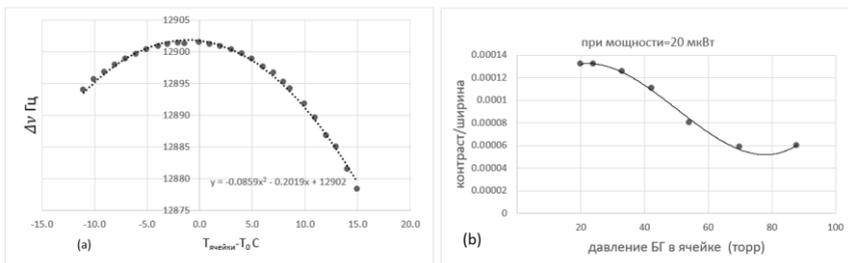


РИС.1.(а). Зависимость ширины КПН-резонанса от температуры ячейки ($\text{Ar}+\text{N}_2$)
 (б) отношение контраста и ширины КПН зависит от давления ячейки.

ячейках, изготавливаемых лазерной сваркой, реальное давление отличается от номинального из-за разогрева ячейки при герметизации.

Для достижения высокой стабильности атомных КПН-часов необходимо увеличивать контраст C и уменьшать ширину линии $\Delta\nu_{\text{КПН}}$ резонанса, что достигается оптимизацией состава смеси БГ. Были исследованы зависимости ширины КПН-резонанса и контраста от давления в серии ячеек. Определено давление БГ (25 ± 5 Торр), при котором отношение контраста к ширине оптимальны (рис.1б).

Список литературы

1. Knappe, S., Shah, V., Schwindt, P. D., et al. (2004). A microfabricated atomic clock. Applied Physics Letters, 1460-1462.
2. J. Vanier, R. Kunski, N. Cyr, J. Y. Savard, and M. Têtu. (1982). On hyperfine frequency shifts caused by buffer gases: Application to the optically pumped passive rubidium frequency standard. Applied Physics 53, 5387; doi: 10.1063/1.331467.

Х.Б. АШУРОВ, М.Ш. КУРБАНОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики
Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан*

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз является головным научным учреждением в Центральной Азии, в котором изучаются взаимодействие заряженных частиц и лазерного излучения с веществом, ведутся разработки новых ионно-плазменных технологий обработки поверхности твердых тел, а также технологии синтеза новых материалов, включая материалы с наноразмерными включениями и создаются оригинальные ионно-плазменные устройства для их осуществления.

Kh.B. ASHUROV, M.SH. KURBANOV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences
of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan*

ION-PLASMA TECHNOLOGIES FOR PROCESSING METALS AND SEMICONDUCTORS

The Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan is the leading scientific institution in Central Asia, which studies the interaction of charged particles and laser radiation with matter, develops new ion-plasma technologies for surface treatment of solids, as well as technology synthesis of new materials, including materials with nanoscale inclusions and the creation of original ion-plasma devices for their implementation.

В области электроэрозионной обработки материалов удалось освоить выполнение глухих и прошивку сквозных отверстий в полупроводниках и диэлектриках. Принципиальное отличие разработанных технологий состоит в том, что нами не используется, обычно применяемый в этих случаях вспомогательный электрод, представляющий собой плотно удерживаемую на поверхности обрабатываемой детали, углеродистую пластину, удаление следов которой в известных технологиях представляет собой сложную задачу. Выполнение отверстий ведется с использованием водных растворов электролитов на основе солей и щелочей, в режимах с оптимальным соотношением величины тока и суммарной электрической емкости системы, определяющих ее частотные характеристики, от которых зависит интенсивность кавитационного воздействия на обрабатываемое изделие.

В части электродуговой обработки поверхности труб и других полых длинномерных изделий. Разработаны приемы и конструкции установок позволяющие вести обработку, как внутренних, так и наружных стенок изделий.

Ионная составляющая активно используется нами и в ростовых процессах, связанных с получением методами ионно-молекулярной эпитаксии авто и гетероэпитаксиальных пленок кремния и сплавов Si-Ge на подложках из Si, кварца, ситалла и сапфира.

Освоение процесса получения алкоксисиланов по новым, разработанным в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз технологиям, исключаяющим «индукционный период» реакции технического кремния с этанолом или метанолом и обеспечивающим ведение процессов синтеза триэтаксисилана, а затем моносилана в непрерывном режиме позволили поставить работы по получению аморфного гидрогенизированного кремния с включениями нанокристаллической фазы. Разработан алгоритм процесса разложения как собственно моносилана, так и его смесей с водородом в высокочастотном тлеющем разряде с обеспечением контроля продукта Рамановской спектроскопией, результаты которой указывают на возможность управляемого получения образцов аморфного кремния с нанокристаллическими вкраплениями размером от 16 до 50 нм.

Наряду с освоением новых технологий в институте активно ведутся работы по модернизации существующих с переносом в них приемов, характерных для ионно-плазменных технологий. В частности, на основе анализа факторов, определяющих величину и, главное, стабильность тока, протекающего в плазме электрической дуги в ходе выплавки кремния или ферросилиция в процессе карботермического восстановления предложены приемы его контроля и управления.

Ионизирующее воздействие электрической дуги предложено также использовать для предварительной обработки газообразных углеродистых восстановителей, используемых взамен или совместно с дефицитными в регионе древесным углем и коксами в производстве технического кремния и ферросилиция.

Полезное применение нашла плазма тлеющего разряда и в новой технологии водородного восстановления рения, разработка промышленного варианта ее аппаратного оформления и последующее внедрение даст большой экономический эффект.

К.О. БАЗАЛЕЕВА¹, Е.В. ЦВЕТКОВА²

¹Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия

СТРУКТУРА И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ Fe-17%Cr-12%Ni-2%Mo-0.02%C, СИНТЕЗИРОВАННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Выявлены важные особенности ячеистой структуры аустенитного сплава, сформированной в процессе селективного лазерного плавления (СЛП): установлено, что границы ячеек кристаллизации представляют собой объемные сплетения дислокаций, на которых присутствуют сегрегации атомов легирующих элементов и газовых примесей. Показано, что ячеистая структура в аустенитном сплаве сохраняет свою стабильность до температуры отжига 800 °С, после чего начинаются процессы рекристаллизации.

К.О. BAZALEEVA¹, E.V. TSVETKOVA²

¹RUDN University, Moscow, Russia ²Bauman Moscow State Technical University, Russia

STRUCTURE AND TERMAL STABILITY OF AUSTENITIC STEEL Fe-17%Cr-12%Ni-2%Mo-0.02%C SYNTHESIZED BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD

It was identified the features of cell structure in the austenitic steel formed in the process of selective laser melting (SLM). It was established that cell's boundaries present volume dislocation plexuses in which atomic segregations of alloying elements and gas impurities are present. It was showed that the cell structure in the austenitic steel keeps its stability up to annealing temperature of 800°C and then recrystallization processes start.

Исследование структурных особенностей сплавов, полученных методом СЛП, и их структурной стабильности имеет большое фундаментальное и практическое значение, так как позволяет расширить область применения перспективной технологии синтеза сложнопрофильных изделий, в которой реализуется принципиально новый подход послойного выращивания деталей из порошкового материала, а также определяет температурные интервалы эксплуатации синтезированных объектов.

В данной работе СЛП синтезу подвергалась хромоникелевая аустенитная сталь Fe-17%Cr-12%Ni-2%Mo-0.02%C. Процесс СЛП проводился при следующих параметрах процесса: мощность лазера составляла 50 Вт, скорость сканирования лазера – 100 мм/с, диаметр лазерного пятна – 70 мкм, использовались «перекрестная» стратегия плавления, защитная атмосфера азота, подложка – хромоникелевая аустенитная сталь. Использование данных

технологических параметров позволили сформировать объекты без трещин с пористостью менее 1 % [1].

Структурный анализ аустенитного сплава, проведенный методами металлографического, рентгендифракционного анализов, а также растровой и просвечивающей электронной микроскопии показал, что после СЛП перекристаллизации сплав имеет ячеистое строение, при этом границы ячеек кристаллизации представляют собой объемные сплетения дислокаций, а плотность дислокаций внутри ячеек значительно ниже (структура подобная структуре пластической деформации). При микроспектральном рентгеновском анализе фольг удалось установить, что дислокационные сплетения на границах ячеек закреплены сегрегациями примесных атомов: Cr, Mo, O и N, где Cr и Mo легирующие элементы, O и N газовые примеси из оксидной пленки на поверхности порошка и из защитной атмосферы, соответственно [2]. Формирование подобной структуры приводит к повышению прочностных характеристик стали и к повышению ее термической стабильности.

Сопоставление результатов термического ДСК-анализа и структурных изменений исходного состояния стали при отжигах в интервале температур от 100 до 1200 °С позволило установить, что до 800 °С сталь сохраняет исходное ячеистое строение, при 900 °С начинается процесс полигонизации, при 1100 °С в структуре стали присутствуют полиэдрические зерна с двойниками отжига, т.е. наблюдается аустенизированная структура [3]. Таким образом, сформированная при СЛП ячеистая структура, действительно, обладает повышенной термической стабильностью, сохраняя свои параметры до температуры отжига 800 °С.

Список литературы

1. Yadroitsev I., Gusarov A., Yadroitsava I., Smurov I. // Journal of Materials Processing Technology. 2010. № 210, P. 1624–1631.
2. Базалеева К.О., Цветкова Е.В., Балакирев Э.В., Базалеев Е.В., Казаков А.В. // Материаловедение. 2019. №3, С. 24-29.
3. Базалеева К.О., Цветкова Е.В., Балакирев Э.В., Ядройцев И.А., Смулов И.Ю. // Металлы. 2016. №3, С. 31-39.

А.С. БЕЛОВ¹, В.Н. ПУГАЧЕВА²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
²РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская область, Россия

ИНТЕРФЕРОМЕТР РАДИАЛЬНОГО СДВИГА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ АБЕРРАЦИЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассчитаны основные узлы интерферометра для измерения волнового фронта излучения в оптическом тракте многопроходных лазерных установок. Разработана программа обработки интерферограмм и проведена ее аттестация. Измерена аппаратная функция интерферометра и проведена его аттестация измерением части оптического тракта установки «Луч».

A.S. BELOV¹, V.N. PUGACHEVA²

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia
²RFNC – VNIIEF, Sarov, Russia

RADIAL SHIFT INTERFEROMETER AND MEASURE OF STATIC ABERRATIONS OF MULTIELEMENT OPTICAL SYSTEMS

The main unit of interferometer for measuring the wavefront of the beam in the optical path of the multi-pass laser installations. A program for processing interferograms has been developed and certificated. The hardware function of the interferometer and its certificated out by measuring part of the optical path of the “Luch” installation.

Современные многопроходные лазерные усилительные системы состоят из большого количества оптических элементов, вносящих искажения - абберрации в волновой фронт проходящего через них излучения. Определение величины таких искажений является принципиальным вопросом для определения режимов работы лазерных установок.

В работе представлен мобильный интерферометр радиального сдвига, который позволяет производить контроль оптических систем на этапе монтажа элементов. Изменяя расположение и ориентацию элементов, можно снизить суммарные абберрации системы, что позволяет улучшить качество излучения.

Для работы интерферометра была разработана программа обработки изображений и проведено ее тестирование при задании абберраций, характерных для установки «Луч», получена погрешность восстановления расчетного волнового фронта из синтезированной интерферограммы: $PV \approx 0,1$ мкм и $RMS \approx 0,025$ мкм. С использованием излучения с плоским ВФ проведена аттестация аппаратной функции интерферометра. Получена аппаратная

погрешность $RMS \approx 0,1$ мкм. Суммарная погрешность измерений и восстановления ВФ из интерферограммы составила примерно 0,16 мкм.

Впервые после модернизации лазерного канала установки «Луч» проведены измерения aberrаций первого усилителя. Измерение осуществлялось по 2-х стадийной процедуре. Искажения ВФ составили: $PV=0,42$ мкм, $RMS=0,08$ мкм. Форма волнового фронта представлена на рис. 1а. Полученные значения составили величину примерно на 40% меньше, чем в аналогичных измерениях (рис. 1б), но в варианте, когда усилитель состоял из активных элементов старого типа [1].

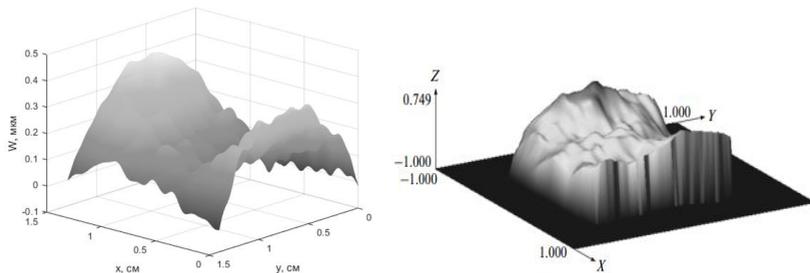


Рис. 1. Волновой фронт излучения на выходе усилителя а) с использованием новых активных элементов б) с использованием старых активных элементов

В настоящее время ведутся работы по улучшению интерферометра: улучшены показатели собственной функции интерферометра, система измерения распределения интенсивности на входе интерферометра, прорабатывается возможность использования интерферометра во время проведения экспериментов для контроля волнового фронта излучения.

Список литературы

1. Бучирин О. А., Деркач И. Н., Еремин А. А., Львов Л. В., Сухарев С. А., Чернов И. Е., Интерферометрическое исследование волнового фронта излучения установки “луч”. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2011, том 37, № 3, с. 257–263.

В.П. БИРЮКОВ¹, Д.В. ПАНОВ², В.Н. ПЕТРОВСКИЙ²,
Д.В. УШАКОВ²

¹Федеральное государственное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благоврава РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный институт «МИФИ», Москва

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ

В работе представлены результаты металлографических и трибологических исследований зон лазерного упрочнения стальных образцов. Проведен полный факторный эксперимент по лазерной закалке с изменением расстояния от фокальной плоскости, мощности излучения и скорости обработки. По уравнениям регрессии получены закономерности изменения глубины и ширины зон закалки. При низкочастотном поперечном сканировании лазерного луча до 90 Гц получены зоны упрочнения шириной 19,8 мм и глубиной 1,42-1,96 мм за один проход. Износостойкость закаленных зон в 3,72 раза выше материала основы.

V. P. BIRYUKOV¹, D. V. PANOV², V. N. PETROVSKY²,
D. V. USHAKOV²

¹Federal budget-funded research Mechanical Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Science, Moscow

²National research nuclear Institute "MEPhI", Moscow

CALCULATION AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF LASER HARDENING ZONES AND WEAR RESISTANCE OF STEEL

The paper presents the results of metallographic and tribological studies of laser hardening zones of steel samples. A full factorial experiment on laser quenching with changes in the distance from the focal plane, radiation power and processing speed was performed. The regularities of changes in the depth and width of the quenching zones are obtained from the regression equations. At low-frequency cross-scanning of the laser beam up to 90 Hz, hardening zones with a width of 19.8 mm and a depth of 1.42-1.96 mm were obtained in one pass. The wear resistance of hardened zones is 3.72 times higher than the base material.

При проведении оптимизации режимов лазерного упрочнения стали AISI 4130 установлено, что скорость сканирования $V=4,5$ мм/с, мощность лазера $P=1500$ Вт, положение фокальной плоскости $F=62$ мм, при этих параметрах плотность мощности составляет 83 Вт/мм². При оптимальности режимах обработки твердость повышается до 7970 МПа, и в 3 раза превышает твердость основного металла 2660 МПа при глубине $1,3$ мм и ширине $9,9$ мм упрочненной зоны. Установлено, что лазерная закалка с перекрытием дорожек 50% имеет более однородную твердость поверхности образца, чем при перекрытии дорожек 30% . Лазерное упрочнение поверхности углеродистой стали AISI 4130

приводит к изменению исходных фаз основного металла на мартенситную фазу[1].

Лазерная термообработка поверхности стали Сk45 создает микроструктуру с 91,65% игольчатого мартенсита и 8,35% остаточного аустенита [2]. Твердость мартенсита достигает до 850 HV, а остаточного аустенита 400–600 HV. Износостойкость образцов закаленных лазером в два раза выше, чем исходной стали.

Целью настоящей работы является определение влияние дефокусировки луча волоконного лазера на глубину и ширину зон лазерного упрочнения, режимов обработки на параметры закаленных зон при низкочастотных поперечных колебаниях луча. На рис. 1 представлены зависимости глубины и ширины зон закалки при различных режимах обработки.

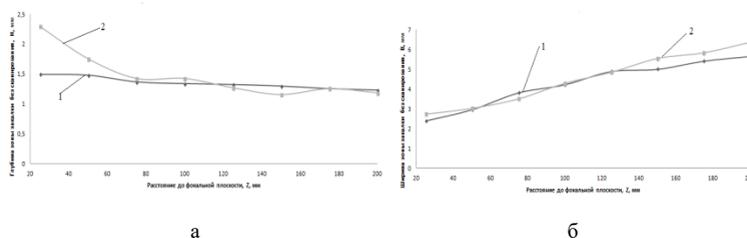


Рис. 1. Зависимость глубины (а) и ширины (б) зон закалки от дефокусировки лазерного луча: 1 – $V = 10$ мм/с, $P = 1000$ Вт, 2 - $V = 18$ мм/с, $P = 1800$ Вт.

Глубина и ширина зоны закалки изменяется практически линейно в интервале дефокусировки луча 100-150 мм. Применение линейных уравнений регрессии показало незначительное расхождение расчетных и экспериментальных значений не более 3,2%. Микротвердость изменялась от 7430 до 7980 МПа. Применение поперечных колебаний луча с частотой до 90Гц позволило получить закаленные слои с шириной 19,6 мм и глубиной 1,42-1,96 мм за один проход. Износостойкость зон лазерной закалки в 3,72 раза выше материала основы.

Список литературы

1. Moradi M., Karami Moghadam M. High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization // Optics and Laser Technology 111 (2019) 554–5702.
2. Adel K. M. Enhancement of Dry Sliding Wear Characteristics of CK45 Steel Alloy by Laser Surface Hardening Processing // Procedia Materials Science. 2014. V.6. p. 1639 – 1643. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.148

В.П. БИРЮКОВ¹, Д.А. СТАРОСТИН², Д.В. КЛЕВЕТОВ²,

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал», Ковров*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА МЕДНОЙ ОСНОВЕ НА СТАЛЬ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

В работе рассмотрен процесс наплавки порошка **на основе меди ПР** – БрАЖ 9,5 – 1, ПР –Л63, ПР – БрОС10–1,5 на образцы стали 40Х с применением излучения непрерывного СО₂-лазера и поперечного сканирования луча с частотой 227 Гц. Показано, что нагрузка заедания зависит от порошкового материала и режимов обработки. Исследовано влияние поперечных колебаний луча на качество и производительность процесса наплавки.

V. P. BIRYUKOV¹, D. A. STAROSTIN², D.V. KLEVETOV²

¹*Federal budget-funded research Mechanical Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Science, Moscow*

²*All-Russian research Institute "Signal", Kovrov*

CALCULATION AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF LASER HARDENING ZONES AND WEAR RESISTANCE OF STEEL

The paper considers the process of surfacing a copper-based powder PR-BrAZh 9.5-1, PR-L63, PR-BrOSi10-1.5 on 40Cr steel samples using continuous CO₂ laser radiation and cross-scanning of the beam with a frequency of 227 Hz. It is shown that the load of jamming depends on the powder material and processing modes. The influence of transverse beam vibrations on the quality and performance of the surfacing process is studied.

Лазерная наплавка порошка алюминиевой бронзы CuAl10, с размером частиц 20-120 мкм, проводилась с использованием диодного лазера TruDiode 4006, фирмы TRUMPF на подложку нержавеющей стали 17-4PH диаметром 100 мм длиной 150 мм. Коэффициент перекрытия наплавленных дорожек составлял 50%. Обработку производили при мощности лазерного излучения 1500 Вт, диаметре луча 3,5 мм, скорости перемещения 300 мм/мин, расходе порошка 16 г/мин, в среде аргона. Введение хрома, в состав наплавляемой шихты, приводит к уменьшению содержания железа в покрытии и повышению его коррозионной стойкости [1].

В экспериментальных исследованиях использовали лазерный комплекс ИМАШ РАН. Образцы изготавливали из стали 40Х размерами 15×20×70 мм. Для наплавки выбраны порошки на основе меди **ПР** – БрАЖ 9,5 – 1, ПР –Л63, ПР – БрОС10–1,5 **с размером частиц 40-150 мкм**. В качестве варьируемых параметров приняты мощность излучения $P=700-1000$ Вт, скорость обработки $V=5-10$ мм/с и диаметр пучка $d=1-2$ мм. Для определения нагрузки задания наплавленных образцов применялась машина трения

универсальная МТУ-01. Испытания проводили по схеме «плоскость (наплавленный образец) - кольцо сталь 50ХФА (51-55HRC). Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,1–4,0 м/с и 1–3 МПа соответственно. В качестве смазочного материала использовали масло гидравлическое МГЕ-10А. Лазерная наплавка образцов выполнялась расфокусированным лучом и с поперечными колебаниями луча по нормали к вектору скорости лазерной обработки, с шагом между дорожками 3 мм. На рис.1 представлены зависимости нагрузки заедания от скорости скольжения для прутковых материалов латуни Л63 (129-138 HV) и бронзы БрАЖ9-4 (115-126 HV) и покрытий наплавленных лазерным лучом (ПНЛЛ) БрАЖ 9,5-1, Л63 (174-196 и 192-218 HV режим наплавки 1 и 2) , БрОС 10-1,5 (169-178 HV).

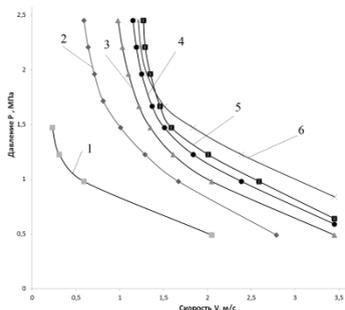


Рис. 1. Зависимость нагрузки заедания от скорости скольжения:

- 1 – прутковая латунь Л63; 2– прутковая бронза БрАЖ9-4; 3 – ПНЛЛ БрАЖ 9,5-1
 4 – ПНЛЛ Л63 (2); 5 – ПНЛЛ Л63(1); 6 – ПНЛЛ БрОС 10-1,5

Анализ кривых (рис.1) показывает, что при скорости скольжения 2 м/с нагрузка заедания для прутковых латуни и бронзы составляет 0,5 и 0,8 МПа соответственно, а для наплавленных покрытий 1,0 – 1,5 МПа в зависимости от состава порошкового материала и режима обработки для Л63.

Список литературы

3. Yang J. et al. Effect of Cr additions on the microstructure and corrosion resistance of Diode laser clad CuAl10 coating // Surface and Coatings Technology 381 (2020) 125215.

DOI: /doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125215.

4. 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.

К.В. БОГДАН^{1,2,3}, А.В. ПЕНТО²

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

²Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

РАСЧЁТ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МАСС-СПЕКТРОВ

В масс-спектрометрии с применением ионизации в атмосферном давлении исследуемые органические соединения могут образовывать ионно-молекулярные комплексы (ИМК). Вид наблюдаемого масс-спектра определяется, главным образом, энергией связи ИМК исследуемых соединений. В работе исследованы различные методы вычислительной квантовой механики для расчёта энергии связи ИМК. Определены оптимальные параметры расчёта, найдены энергии связи ряда ИМК.

K.V. BOGDAN^{1,2,3}, A.V. PENTO²

¹National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

²Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Russia

QUANTUM CALCULATIONS FOR ION MOLECULAR COMPLEXES BOND ENERGY FOR MASS SPECTROMETRY DATA DESCRIPTIONS

In our study we investigated organic compounds by the method of mass spectrometry with ionization in atmospheric pressure. The organic compounds investigated in our study can form ion-molecular complexes (IMC). The type of the observed mass spectrum is determined mainly by the bond energy of the compounds IMC. In our work, we used various methods of computational quantum mechanics for calculating the bond energy of the IMC. We determined the optimal calculation parameters and the bond energies of a number of IMCs.

Лазерная плазма (ЛП) является широкополосным источником УФ-излучения и может быть использована для фотоионизации любых соединений. При использовании ЛП как ионизатора в масс-спектрометрии органических соединений при атмосферном давлении канал прямой фотоионизации практически не наблюдается в масс-спектрах, однако наблюдаются каналы протонирования, димеризации и присоединения аддуктов. Зарегистрированные масс-анализатором ионы являются результатом цепочки столкновительных реакций передачи заряда в газовой фазе. Вид масс-спектра, наблюдаемого в эксперименте, зависит от ряда факторов, одними из которых являются время жизни ИМК, образующихся в результате ионизации, и исходный состав анализируемой смеси. Время жизни ИМК зависит в первую очередь от

величины энергии связи между этими частями комплекса. Для вычисления этой энергии в настоящей работе использовался Basis Set Superposition Error (BSSE).

В рамках этого подхода были использованы распространённые квантово-механические методы для вычисления энергии связи: метод теории возмущений Мёллера-Плессета 2-ого порядка (MP2), являющийся модифицированным методом Хартри-Фока, а так же метод теории функционала плотности (DFT) с использованием различных функционалов, наиболее точно описывающих исследуемые системы.

С использованием программного обеспечения ORCA 4.0.1.2 были проведены расчёты для комплексов, состоящих из молекул воды (H_2O), аммиака (NH_3), этилового спирта ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) и ионов водорода (H^+), гидроксония (H_3O^+), аммония (NH_4^+) методами MP2 в базисе def2-TZVP и DFT с функционалами B3LYP и B3PW91 в базисе def2-TZVP. Теория функционала плотности в отличие от метода Хартри-Фока дает выигрыш по времени вычислений.

Полученные значения энергии связи ИМК соотнесены с имеющимися литературными данными и масс-спектрометрическим экспериментом.

Н.Д. БУХАРСКИЙ¹, Ю.В. КОЧЕТКОВ¹, Ф.А. КОРНЕЕВ¹, К.Л. ГУБСКИЙ¹, М. ЭРЕТ², Ю. АБЭ³, Ф. ЛО³, ДЖ.ДЖ. САНТОС², В. ОСПИНА-БОХОРКЕС², Г. ШАУМАН⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Университет Бордо, Франция

³Осацкий Университет, Япония

⁴Технический Университет Дармштадта, Германия

ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ МОЩНЫМИ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Проведено экспериментальное исследование возможности генерации сильных магнитных полей при воздействии мощных пикосекундных лазерных импульсов на мишени, имеющие выделенное направление протекания разрядных токов. Выполнен предварительный анализ полученных в эксперименте данных протонной радиографии для некоторых типов мишеней.

N.D. BUKHARSKIY¹, Y.V. KOCHETKOV¹, Ph.A. KORNEEV¹, K.L. GUBSKIY¹, M. EHRET², Y. ABE³, F. LAW³, J.J. SANTOS², V. OSPINA-BOHORQUEZ², G. SHAUMANN⁴

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²Université de Bordeaux, France

³Osaka University, Japan

⁴Technische Universität Darmstadt, Germany

PROTON RADIOGRAPHY OF MAGNETIC FIELDS GENERATED BY IRRADIATING TARGETS WITH INTENSE PICOSECOND LASER PULSES

The possibility of strong magnetic field generation in targets with dedicated discharge current flow direction under the action of intense picosecond laser pulses was studied experimentally. Preliminary analysis of proton radiography data obtained in the experiment was carried out for some types of the targets.

При фокусировке короткого лазерного импульса в пятно малого диаметра на поверхности мишени часть быстрых электронов покидает ее объем. В результате этого в мишени возникают токи разряда, которые при определенной геометрии мишени могут иметь выделенное направление и приводить к созданию сильных магнитных полей величиной до нескольких кТл. Исследование пространственной структуры этих полей, их величины и временной динамики представляет большой интерес в контексте возможного применения лазерных методов генерации магнитных полей для решения широкого спектра научно-технических задач – от управления пучками

заряженных частиц до получения намагниченной плазмы в экспериментах по лабораторной астрофизике.

В данной работе на базе установки PHELIIX в GSI (Дармштадт, Германия) было проведено исследование процессов генерации магнитных полей и получения намагниченной плазмы в различных типах мишеней при воздействии на них субпикосекундного (0,5 пс) лазерного импульса с энергией около 50 Дж. Изучались как предложенные и испытанные ранее геометрии типа «улитка» [1], так и принципиально новые «хиральные» (с нарушением осевой симметрии) геометрии [2]. В качестве основной диагностики использовалась протонная радиография, основанная на регистрации отклоненных магнитными и электрическими полями протонов диагностического пучка на радиохромной пленке и последующем определении по полученным изображениям параметров полей в исследуемой области.

Для обработки полученных в эксперименте радиограмм осуществлялось компьютерное моделирование пролета протонного пучка через область взаимодействия мишени с лазерным импульсом. Для этого задавался контур протекания тока разряда, рассчитывалось создаваемое им магнитное поле и для протонов в пучке решалось уравнение движения; конечные координаты частиц в области, соответствующей радиохромной пленке, записывались в массив и выводились в виде изображения.

По описанной методике была выполнена обработка данных протонной радиографии для двух мишеней спирального типа. Предварительный результат этой обработки свидетельствует о наличии в области мишеней магнитных полей порядка десятков – сотен Тл. Для более точной интерпретации полученных в эксперименте данных требуется последовательный поиск оптимальной структуры полей для минимизации расхождения синтезированной радиограммы с экспериментальной. Работа в этом направлении ведется в настоящий момент.

Список литературы

1. Ehret, M. *et al.* Kilotesla plasmoid formation by a trapped relativistic laser beam. arXiv:1908.11430 [physics.plasm-ph] (2019).
2. Korneev, P., Tikhonchuk, V. & Humières, E. Magnetization of laser-produced plasma in a chiral hollow target. *New J. Phys.* **19**, 033023 (2017).

А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, М.И. САЗОНОВ, В.М. ХВИСЕВИЧ,
Д.Л. ЦЫГАНОВ

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДВИЖНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ

Работа посвящена исследованиям поверхностной плазменной закалки деталей и инструмента движущейся плазменной дугой. Такое упрочнение деталей характеризуется рядом преимуществ: небольшой глубиной закалки и всего лишь в местах износа; твердость поверхностного слоя заметно выше, чем при объемной закалке; отсутствие термических деформаций деталей благодаря локальности и кратковременности взаимодействия плазмы с поверхностью металла.

A.I. VERAMEICHYK, M.I. SASONOV, V.M. HVISEVICH,
D.L. TSYGANOV

Brest State Technical University, Brest, Belarus

SURFACE STRENGTHENING OF INSTRUMENTAL STEELS BY USED MOBILE PLASMA ARC

We present the results of surface plasma hardening the moving plasma arc. Hardening has characterized the series of improvements: a small quenching depth; the hardness of the surface layer is noticeably higher than in bulk hardening; in the absence of thermal deformations; the duration between the plasma and the metal surface is the locality and short.

Для повышения износостойкости в процессе трения и повышения сопротивляемости пластическому и хрупкому разрушению инструментальных сталей используется поверхностное плазменное упрочнение [1], наиболее полно обеспечивающее оптимальное сочетание величины вязкости сердцевины с высокой поверхностной твердостью. Такое упрочнение можно реализовать только путем локальной закалки при помощи быстро перемещающегося высококонцентрированного источника тепла [1-3].

Нами в качестве высококонцентрированного источника тепла была выбрана плазменная дуга. Для генерации плазменной дуги разработана установка. Разработанная установка состоит из плазматрона постоянного тока, силового источника питания дуги, устройства ВЧ-поджига дуги, систем газоснабжения аргоном и азотом и водоохлаждения плазматрона. Для перемещения плазматрона с заданной скоростью создана система устройств для движения упрочняемой детали относительно плазматрона. Силовой источник обеспечивает горение дуги при напряжении 14–35 В и токах до 32 А и генерировал плазменную дуга мощностью 0,4–1,1 кВт.

Плазменное упрочнение производилось при токах дуги $I = 6\text{--}32$ А и использовании в качестве плазмообразующего газа смеси аргона и азота; в плазмотроне применено обжимающее сопло с диаметром отверстия, равном $0,9\text{--}1,2$ мм. Скорость перемещения плазмотрона варьировалась от 4 до 27 мм/с. Установлено, что ширина упрочненной плазменной дугой «дорожки» составляет $0,3\text{--}4,2$ мм, а зона термического воздействия плазменной дуги имеет форму сегмента.

Исследованы микротвердость поверхностного слоя в зависимости от расхода аргона, тока дуги, скорости перемещения плазмотрона, получены соответствующие зависимости. На рис. 1 представлено типичное распределение микротвердости по глубине упрочняемого слоя.

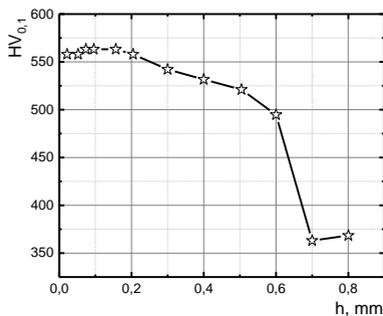


Рис 1. Распределение микротвердости упрочненного слоя по глубине стали при токе дуги $I = 16$ А.

Достигнуто увеличение микротвердости до $500\text{--}560$ $HV_{0,1}$, причем толщина упрочненного слоя может изменяться в зависимости от скорости упрочнения от $0,1$ до $0,7$ мм. Экспериментально подтверждена возможность закалки при наложении соседних дорожек друг на друга с расстояниями между их осями, равном $0,4$ мм; при этом микротвердость составила $532\text{--}566$ $HV_{0,1}$.

Список литературы

1. Райцес В.Б. Термическая обработка. – М.: Машиностроение, 1980. – 247 с.
2. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. – Мн.: Высшая школа, 1988. – 155 с.
3. Рыкалин Н.Н., Углов А.Л., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

А.А. ГАРМАТИНА^{1,2}, М.М. НАЗАРОВ², М.В. ЧАЩИН^{1,2},
и В. М. ГОРДИЕНКО²

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Физический факультет и МЛЦ, Московский государственный университет им М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА АБЛЯЦИИ И ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ФИЛАМЕНТА НА ТВЕРДОТЕЛЬНУЮ МИШЕНЬ В РЕЖИМЕ ПОНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Показано, что средняя скорость абляции медной фольги при воздействии филаментом, формируемым с помощью линзы ($F=2,5$ м), испытывает рост при уменьшении давления воздуха в диапазоне 1-0,1 атм в режиме сохранения постоянного соотношения $P/P_{кр}$. Полученные данные свидетельствуют об увеличении плотности энергии в филаменте. Измерение выхода рентгеновского излучения и средней скорости абляции вдоль филамента позволило оценить длину филамента, а также такие локальные параметры как локальная плотность энергии и интенсивность.

A.A.GARMATINA^{1,2}, M.M.NAZAROV¹, M.V.CHASHIN^{1,2} AND
V.M.GORDIENKO²

¹National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Faculty of Physics and International Laser Centre M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

PECULIARITIES OF ABLATION AND X-RAY GENERATION UNDER FEMTOSECOND FILAMENT INTERACTION WITH SOLID TARGET IN THE MODE OF PRESSURE REDUCTION

It is shown that the average ablation rate of a copper foil when exposed to a filament formed using a lens ($F=2.5$ m) experiences an increase when the air pressure decreases in the range of 1-0. 1 atm in the regime of maintaining a constant P/P_{cr} ratio. The data obtained indicate an increase in the energy density in the filament. Measuring the x-ray output and the average ablation rate along the filament allowed us to estimate the length of the filament, as well as local parameters such as local energy density and intensity.

Изучение процесса фемтосекундной лазерной филаментации в газе низкого давления потенциально актуально как в плане дистанционной микрообработки материалов, аналогично тому как это осуществляется при нормальном давлении воздуха [1], так и с целью получения интенсивных терагерцовых импульсов [2]. Это обуславливает необходимость характеристики локальных параметров филамента. С этой целью нами проведены исследования по определению средней скорости абляции медной фольги толщиной 80мкм, подвергнутой облучению фемтосекундным TiSa лазерным филаментом,

создаваемым в воздухе с помощью линзы ($F=2,5$ м) в диапазоне давлений 0,1-1 атм (использована камера взаимодействия) при условии сохранения отношения мощности к критической мощности самофокусировки $P/P_{кр} \sim 3-8$. Обнаружено увеличение средней скорости абляции до двух раз (рис.1). Оценено увеличение плотности энергии в филаменте, величина которого казалась 2,4. Измерение локальной скорости абляции и выхода рентгеновского излучения вдоль филамента показало, что плотность энергии и интенсивность практически не изменяется вдоль филамента. При этом длина филамента при уменьшении давления от 1 до 0,1 атм увеличилась примерно в 2 раза. Измерения величины средней скорости абляции и выхода рентгеновского излучения при фиксированной энергии в зависимости от давления воздуха позволили определить условия формирования филамента.

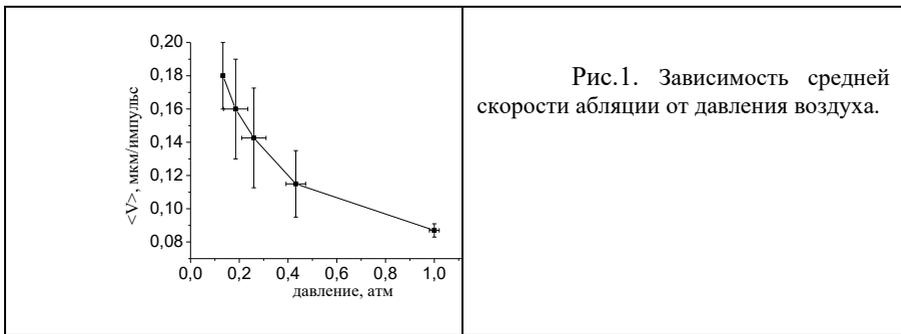


Рис.1. Зависимость средней скорости абляции от давления воздуха.

Работа поддержана проектом РФФИ N18-02-00952.

1. D.Kiselev et al, Filament-induced laser machining, Appl.Phys.B, 100, 515 (2010).
2. Y. Yoo et al, Highly enhanced terahertz conversion by two-color laser filamentation at low gas pressures, Optics Express, 27(16), 22663 (2019).

Р.Д. ГЛУХОВ, Т.В. КАЗИЕВА, К.Л. ГУБСКИЙ, А.П. КУЗНЕЦОВ,
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В УСТАНОВКЕ КАЛИБРОВКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ТВЕРДОМЕРОВ

Проведена оценка точности системы для калибровки твердомеров, основанной на одноканальном волоконном интерферометре с прямым преобразованием доплеровских сигналов. Система рассчитана на измерение скоростей до 10м/с, с точностью до 0.001 м/с.

R.D. GLUKHOV, T.V. KAZIEVA, K.L. GUBSKIY, A.P. KUZNETSOV

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

ACCURACY ESTIMATION OF SPEED MEASUREMENT SYSTEM IN LEEB HARDNESS TESTER

Accuracy of speed measurement system in leeb hardness tester was evaluated. A system for calibrating hardness gauges is based on a single-channel fiber interferometer with direct conversion of Doppler signals, allows to measure speeds up to 10m /s with an accuracy of 0.001 m /s.

В настоящее время широкое распространение получили динамические твердомеры, основанные на методе измерения соотношения скоростей падения и упругого отскока ударника, предложенном Либом. Это связано с тем, что динамические твердомеры Либса представляют собой автономные портативные приборы, позволяющие проводить измерения вне лабораторий, на поверхностях деталей сложной формы и в труднодоступных местах. Распространение портативных динамических твердомеров привело к необходимости разработки систем для их калибровки в производственных условиях.

Основной проблемой измерения твердости металлов при помощи твердомеров, основанных на методе Либса, является необходимость обеспечения строго определенных скоростей индентора (с точностью 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 вызывает износ механической части твердомера, что приводит к необходимости проведения периодических калибровок.

Используемый интерферометрический метод измерения скорости основан на анализе доплеровского сдвига частоты монохроматической волны, отраженной от движущейся поверхности исследуемого образца. Принцип действия методики

PDV (Photonic Doppler Velocimetry), состоит в направлении непрерывного лазерного излучения к поверхности исследуемого объекта, формирования гетеродинного сигнала биений при смещении отраженного от поверхности объекта лазерного излучения с опорным, и регистрации сигнала, частота которого определяется доплеровским частотным смещением $f_D = 2V/\lambda$, где λ — длина волны лазера, V — составляющая вектора скорости, ориентированная вдоль оси зондирующего лазерного пучка. Данная методика невосприимчива к внешним воздействиям и позволяет изготавливать компактные измерительные схемы на основе оптоволоконных компонентов.

Для восстановления динамики изменения частоты регистрируемого сигнала применяется преобразование Фурье. Дискретные спектры могут быть использованы для измерения частот синусоидальных составляющих сигнала. Такое измерение состоит в оцифровке составного сигнала, выполнении оконных выборок сигналов и вычисления их спектра дискретной величины, с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT). Частоты отдельных компонентов можно оценить по их расположению в дискретном спектре с разрешением, зависящим от количества выборок. При оценке ошибки, возникающей при определении частоты методом PDV ранее использовалось соотношение между неопределенностью по частоте и шириной анализируемого окна. Данное приближение справедливо только если есть возможность принять сигнал на данном промежутке постоянным, если же в сигнале присутствуют резкие скачки, то данное приближение не работает.

В тоже время, частота синусоидального компонента может быть определена с улучшенным разрешением с помощью интерполяционной функции Гауса через три самых больших последовательных элемента спектра. Оценка значения по абсциссе максимума интерполированной функции позволяет увеличить точность определения частоты на три порядка.

Работа выполнена при поддержке фонда «Фонд содействия развитию

малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках программы УМНИК-2018

В.С. ГОРЕЛИК^{1,2}, С.В. ПИЧКУРЕНКО², В.В. ФИЛАТОВ²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия,

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ МИКРОПОЛОСТИ ГЛОБУЛЯРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Анализируется возможность лазерной генерации в глобулярном фотонном кристалле опалового типа за счет бозе-эйнштейновской конденсации поляритонов в приповерхностной микрополости композита. Предлагаются схемы управляемой и автоматической фемтосекундной импульсной генерации на основе электро-, магнитооптического, а также сегнетоэлектрического эффектов.

V.S. GORELIK^{1,2}, S.V. PICHKURENKO², V.V. FILATOV²

¹*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

OPTICAL-PUMPED VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITTING LASING IN THE GLOBULAR PHOTONIC CRYSTAL

We analyze the laser generation in the globular photonic crystal by the Bose-Einstein condensation of polaritons in the nearest-to-the-surface microcavity of the composite. We propose the technique of the tunable and the self-tunable femtosecond photonic crystal lasing by the electro-, magneto-optical and ferroelectrical effects.

В настоящее время большой интерес во всем мире вызывают новые композиционные материалы с периодической сверхструктурой – фотонные кристаллы – нанокompозиты, обладающие запрещенными фотонными зонами в оптическом диапазоне. Подобные оптические гетероструктуры являются оптическими аналогами полупроводников, что делает их изучение чрезвычайно актуальным.

Ранее нами было установлено [1], что возбуждение глобулярного фотонного кристалла монохроматическим излучением с длиной волны, соответствующей краю запрещенной фотонной зоны композита, приводит к накачке приповерхностной микрополости образца, что открывает перспективы использования фотонного кристалла в качестве рабочего тела поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором. В данной работе обсуждаются особенности реализации микрополостной лазерной генерации в глобулярном фотонном кристалле при его оптической накачке широкополосным излучением.

Как показывают расчеты (рис. 1), при внешнем широкополосном оптическом возбуждении приповерхностная микрополость гранцентрированной кубической решетки искусственного опала выступает в качестве твердотельного микрорезонатора, осуществляя селекцию частот, соответствующих краям запрещенных фотонных зон. При этом излучение соответствующих частот «запирается» в микрополости и в дальнейшем может быть искусственно извлечено посредством внешнего воздействия, например, с помощью электро- или магнитооптических эффектов. Для этого в опаловую матрицу композита предварительно необходимо ввести наночастицы соответствующей природы. Заметим при этом, что заполнение опаловой матрицы сегнетоэлектрическими включениями позволяет реализовать регулярное по времени автоматическое «открытие» микрополости при достижении внутриволостным полем критического значения. При этом время «выборки» излучения составляет порядка 1 фс. Таким образом, в фотонном кристалле могут быть реализованы механизмы как непрерывной, так и фемтосекундной импульсной генерации, причем когерентность излучения обеспечивается сформированным в микрополости поляритонным бозе-конденсатом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №18-02-00181).

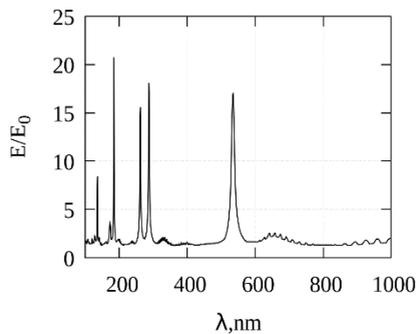


Рис. 1. Усиление электромагнитного поля в приповерхностной микрополости глобулярного фотонного кристалла с диаметром глобул $D = 250$ нм при 0,1 пс широкополосной оптической накачке

КОГЕРЕНТНОЕ ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ОТ СЛУЧАЙНОГО АНСАМБЛЯ МИ-ЧАСТИЦ, ПОМЕЩЕННОГО В СРЕДУ С МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

В работе решена задача о когерентном усилении обратного рассеяния поляризованного света от случайного ансамбля Ми-частиц, помещённого в магнито-активную однородную среду. Показано, что в отсутствие деполаризации света магнитное поле не приводит к подавлению интерференции между многократно рассеянными электромагнитными волнами. Обнаружено, что при падении на образец линейно-поляризованного света в конусе когерентного обратного рассеяния возникают два максимума. Полученные результаты согласуются с данными эксперимента.

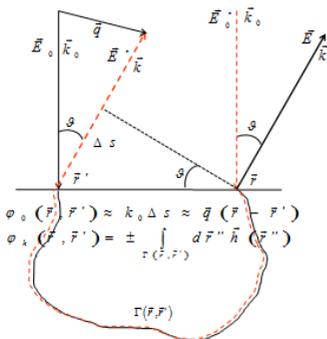
E.E.GORODNICHEV, D.B.ROGOZKIN

National Research Nuclear University "MEPhI"

COHERENT BACKSCATTERING FROM AN ENSEMBLE OF MIE-PARTICLES IMMERSED IN A MAGNETO-OPTICALLY MEDIUM

We study the problem of coherent backscattering of polarized light from a random ensemble of Mie-particles placed in a magnetically active homogeneous medium is solved. It is shown that in the absence of light depolarization, the magnetic field does not suppress the interference between multiply scattered electromagnetic waves. It was found that when linearly polarized light is incident on a sample, two maxima arise in the cone of coherent backscattering. The results obtained are consistent with the experimental data.

Как известно, эффект слабой локализации возникает в результате интерференции волн, распространяющихся вдоль одинаковых лучевых траекторий навстречу друг другу, и тесно связан с T -инвариантностью рассеивающей среды [1]. Общепринято, что наличие магнитного поля нарушает указанную симметрию и приводит к подавлению интерференции. В металлах с примесями это проявляется в уменьшении сопротивления при наложении магнитного поля. В экспериментах по когерентному обратному рассеянию света наличие магнитного поля приводит к уменьшению фактора усиления отражения точно-назад [1,2], что, на первый взгляд, также подтверждает негативное влияние магнитного поля на слабую локализацию электромагнитных волн.



Рассмотрим случайный ансамбль Ми-частиц, помещённый в магнито-активную однородную среду. Оптические параметры частиц подчиняются первому условию Керкера и деполаризацией циркулярно поляризованного света в однократном рассеянии можно

пренебречь [3]. Магнитное поле направлено вдоль поверхности образца. Как показано в работе, в такой среде интерференция волн при многократном рассеянии происходит независимо в право- и лево-поляризованных модах (векторных куперонах) аналогично интерференции скалярных волн. Отличие заключается в том, что из-за наличия магнитного поля волна приобретает дополнительную фазу $\pm k_0 \int_{\Gamma} \frac{1}{h} \mathbf{r}$ (k_0 - волновое число, \mathbf{h} - вектор гирации). Соответственно, дополнительная разница фаз между двумя волнами, интерферирующими в "лучевой трубке" куперона (см. рисунок), равна

$$ik_0 \int_{\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}')} \frac{\mathbf{r}}{h(\mathbf{r}'')} d\mathbf{r}'' = ik_0 \oint \frac{\mathbf{r}}{h(\mathbf{r}'')} d\mathbf{r}'' + ik_0 \int_{\mathbf{r}'}^{\mathbf{r}} \frac{\mathbf{r}}{h(\mathbf{r}'')} d\mathbf{r}'' \quad (1)$$

где $\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ - контур, охватываемый лучевой трубкой. Интегрирование в первом интеграле справа проводится по контуру, получающемуся путём замыкания $\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ (см. рисунок). Если магнитное поле пространственно однородно, то интеграл по замкнутому контуру в (1) обращается в нуль. Суммируя по всем возможным лучевым трубкам, для интерференционного вклада $I_{\pm}^{(c)}$ получаем соотношение

$$I_{\pm}^{(c)}(\mathbf{q}) = I_{scalar}^{(c)}(\mathbf{q} \pm k_0 \mathbf{h}) \quad (2)$$

где $I_{scalar}^{(c)}(\mathbf{q})$ - интерференционный вклад в интенсивность в скалярном случае [1]. Из (2) следует, что магнитное поле не приводит к подавлению интерференции между многократно рассеянными электромагнитными волнами. В частности, при падении циркулярно поляризованной волны, пик когерентного обратного рассеяния, из-за дополнительного «магнитного» сдвига фаз, оказывается только смещён относительно направления рассеяния точно-назад на угол $\vartheta_{\max} = \pm k_0 h$.

Линейно поляризованная волна представляет собой суперпозицию двух полей с противоположными круговыми поляризациями и одинаковыми амплитудами. Поэтому при падении света с линейной поляризацией интерференция будет наблюдаться в обоих (право-, лево-) векторных куперонах. В результате, в отсутствие деполяризации как ко-, так и кросс-поляризованной компонент интенсивности в конусе когерентного обратного рассеяния совпадают [4] и равны:

$$I_{P,\perp}^{(c)}(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \cdot \left(I_{scalar}^{(c)}(\mathbf{q} + k_0 \mathbf{h}) + I_{scalar}^{(c)}(\mathbf{q} - k_0 \mathbf{h}) \right) \quad (3)$$

Согласно (3), при $\frac{\Gamma}{q}Ph^1$ угловое распределение когерентного обратного рассеяния имеет два максимума при $g_{\max}^{(1,2)} = \pm k_0 h$. Учёт деполяризации при многократном рассеянии приводит к уменьшению амплитуд интенсивности в пике когерентного обратного рассеяния. Этот эффект наблюдался ранее в [2]. Там же было указано, что теория когерентного обратного рассеяния света в магнитном поле, развитая в [5], не может объяснить тонкую структуру наблюдаемого углового распределения.

Список литературы

1. С.М. Aegerter and G. Maret, *Coherent backscattering and Anderson localization of light*, in *Progress in Optics*, **52**, 1 (2009).
2. R. Lenke, R. Lehner, G. Maret, *Europhys. Lett.*, **52**, 620 (2000)
3. Городничев Е.Е., Кузовлев А.И., Рогозкин Д.Б., Письма в ЖЭТФ, **104**, 155 (2016); Квантовая электроника, **46**, 947 (2016).
4. Городничев Е.Е., Кузовлев А.И., Рогозкин Д.Б., Письма в ЖЭТФ, **68**, 21 (1998); ЖЭТФ, **133**, 839 (2008).
5. Lacoste D, van Tiggelen B. A., *Phys. Rev. E*, **61**, 4556 (2000).

О.И. ГОРЧАКОВ, Л.А. ДУШИНА, Д.С. КОРНИЕНКО,
А.Г. КРАВЧЕНКО, К.В. СТАРОДУБЦЕВ, В.М. ТАРАКАНОВ
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, Россия

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО- ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛОСКОСТИ ПЯТНА ОБЛУЧЕНИЯ

Разработана методика исследования пространственно-временного распределения интенсивности в пятне облучения формируемого линзовым растром. Проведены измерения длительности, формы импульса и пространственно-временная неоднородность лазерного излучения в эквивалентной плоскости пятна облучения.

O. I. GORCHAKOV, L. A. DUSHINA, D. S. KORNIYENKO,
A. G. KRAVCHENKO, K. V. STARODUBTSEV,
V. M. TARAKANOV

*Russian Federal Nuclear Center, All-Russia Scientific Research Institute of Experimental
Physics, Sarov, Russia*

THE TECHNIQUE OF INVESTIGATION OF SPACE-TIME PARAMETERS OF LASER RADIATION IN THE EQUIVALENT PLANE OF THE SPOT OF IRRADIATION

Developed technique the space-time intensity distribution in the spot of irradiation formed by the lens raster was studied. The measurements were made of duration, impulse shape and space-time heterogeneity of laser radiation in the equivalent plane of the spot.

Основной целью работы являлось разработка методики исследования пространственно-временных параметров лазерного излучения в эквивалентной плоскости пятна облучения мишени малой камеры взаимодействия мощной лазерной установки «Луч» РФЯЦ-ВНИИЭФ [1]. Данная методика предназначена для исследования пространственно-временного распределения интенсивности в пятне облучения формируемого линзовым растром в экспериментах по исследованию ударной сжимаемости веществ.

Для проведения измерений разработана и реализована оптическая схема позволяющая проводить пространственно-временную регистрацию вертикального сечения эквивалентного пятна облучения мишени и фотохронограф с щелевой разверткой типа СЭР-5 [2]. Методика расширяет существующий комплекс диагностики параметров лазерного излучения воздействующего на мишень в экспериментах по ударной сжимаемости веществ, а так же позволяет получить следующие пространственно-временные параметры лазерного излучения в эквивалентной плоскости пятна облучения: локальной длительность и форме импульса, пространственно-временном

распределении интенсивности и пространственно-временной неоднородности излучения.

Список литературы

1. Voronich I.N., Galakhov I.V., Garanin S.G. et al. // Quantum Electron. 2003. Vol. 33(6). P. 485.
2. Д. С. Корниенко, А. Г. Кравченко, Д. Н. Литвин, Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза, ПТЭ, 2014, №2, с. 79-89.

В.Е. ГРИШКОВ, С.А. УРЮПИН

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ГЕНЕРАЦИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА СТРУКТУРУ ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ

Эффективность генерации ТГц излучения в скин-слое металла значительно возрастает при нанесении нанослоя диэлектрика на металлическую поверхность. Дополнительная возможность увеличения эффективности генерации возникает при использовании слабо сфокусированного импульса с длительностью превышающей обратную частоту столкновений в металле.

V.E. GRISHKOV, S.A. URYUPIN

P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

THz RADIATION GENERATION UNDER ACTION OF AN ULTRASHORT FOCUSED LASER PULSE ON A DIELECTRIC- METAL STRUCTURE.

Efficiency of THz radiation generation in skin layer of metal increases significantly when a dielectric nanolayer is deposited on metal surface. Additional opportunity to increase generation efficiency is to use a weakly focused laser pulse with a duration exceeding the inverse collision frequency in metal.

Генерация излучения терагерцевого диапазона при воздействии сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов на металлы изучается сравнительно давно. В частности, появление излучения на частотах сравнимых или меньших обратной длительности лазерного импульса связывается с пондеромоторным воздействием лазерного излучения и с быстрым неоднородным нагревом электронов. Вместе с тем, эти механизмы характеризуются сравнительно небольшой эффективностью преобразования лазерного излучения в терагерцевое. Нами рассмотрена возможность генерации в скин-слое металла, на который нанесен тонкий слой диэлектрика с большой шириной запрещенной зоны. В этом случае, с одной стороны возможно усиления поля на границе диэлектрик-металл из-за интерференции падающей и отраженной волн в диэлектрике, а с другой стороны, по-прежнему, генерация низкочастотного излучения обусловлена нелинейными эффектами в скин-слое металла. Чтоб приблизить теорию к существующим экспериментам, рассмотрение проведено для случая воздействия сфокусированного излучения. Для упрощения изложения расчеты воздействия сфокусированного излучения представлены в случае, когда излучение падает нормально на диэлектрик, нанесенный на поверхность проводника. В такой геометрии (см. Рис.1) генерация терагерцевого излучения возникает из-за воздействия

пандеромоторной силы и градиента давления электронов. Используя уравнения поля, а также явный вид низкочастотных токов, возникающих при воздействии короткого лазерного импульса на твердотельную структуру, найден Фурье образ низкочастотного магнитного поля в вакууме, с помощью которого получено выражение для полной энергии низкочастотного излучения. На Рис.2 представлен график зависимости полной энергии низкочастотного поля $W(d)$ от толщины слоя диэлектрика d . Из Рис.2 видно, что благодаря интерференции падающей и отраженной волн в диэлектрике возможно увеличение мощности генерируемого излучения более чем на порядок. Эффективность генерации возрастает пропорционально четвертой степени модуля амплитуды функции, описывающей усиление высокочастотного поля на поверхности проводника из-за интерференции в диэлектрике. При воздействии лазерного излучения на структуру диэлектрик - проводник с частыми столкновениями электронов проводимости доминирует генерация вследствие неоднородного нагрева электронов. При этом тогда, когда размер фокального пятна больше длины лазерного импульса, генерируемая энергия возрастает пропорционально размеру фокального пятна.

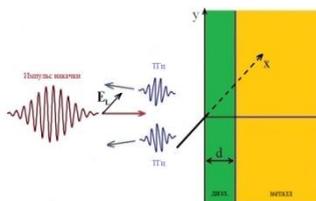


Рис. 1 Схема генерации ТГц излучения.

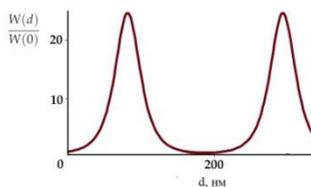


Рис.2 Зависимость энергии низкочастотного поля $W(d)$ от толщины диэлектрического слоя d .

Е. ХУАНБАЙ., А.С. ЕРЖАНОВ, Б.А. ЖАУТИКОВ, А.А. АЙКЕЕВА
*Карагандинский Государственный Индустриальный Университет,
Темиртау, Казахстан*

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК YBCO ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Исследованы микроструктура и кислородная стехиометрия пленок YBaCuO, полученных методом лазерной абляции. Показаны зависимости удельного электропроводности и сверхпроводящих параметров пленок от микроструктуры и кислородной стехиометрии.

Y. KHUANBAY, A.S. YERZHANOV, B.A. ZHAUTIKOV,
A.A. AIKEEVA

Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

THE STUDY OF THE SUPERCONDUCTING PROPERTIES OF YBACUO FILMS PRODUCED BY LASER ABLATION METHOD

Microstructure and oxygen stoichiometry of YBaCuO films manufactured by laser ablation are investigated. Dependence of the specific electrical resistivity and superconducting parameters of films on microstructure and oxygen stoichiometry is demonstrated.

Согласно данным источника [1] перспективным материалом современной криоэнергетики является высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП) $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBaCuO) в форме пленок на различных диэлектрических подложках. В настоящей работе изучаются структурные свойства и сверхпроводящие характеристики пленок YBaCuO, полученных методом лазерной абляции на монокристаллической подложке SrTiO₃ (100).

По данным источника [2] установлены зависимости критической температуры и ширины сверхпроводящего перехода от кислородной стехиометрии $7-x$. Расчет кислородной стехиометрии ($7-x$) исследуемых пленок был проведен на основе микроанализа элементного состава по специальной программе PHI-RHO-Z путем математической обработки характеристических рентгеновских энергодисперсионных спектров. В микроструктурных исследованиях и для получения энергодисперсионных спектров пленок YBaCuO использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JEOL JSM-5910. Энергия электронов зонда составляет 20 кэВ, ток зонда равен 0,1нА, продолжительность измерения 50 с. Как видно из рисунка 2 получены пики OK_α , YL_α , $YL1$, BaL_α , $BaL1$, BaL_β , CuL_α , $CuL1$, CuK_α , CuK_β . В соответствии с дипольными правилами отбора пики OK_α , CuK_α возникают вследствие перехода атомных состояний $2p_{3/2} \rightarrow 1s_{1/2}$ и отвечают преимущественно валентным p-электронам атомов кислорода и меди; YL_α , BaL_α , $CuL_\alpha-3d_{5/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ и вследствие

малости вкладов в интенсивность s-электронов, несут информацию о d-электронах атомов иттрия, бария, меди; $VaL_{\beta} - 3d_{3/2} \rightarrow 2p_{1/2}$; $CuK_{\beta} - 3p_{3/2} \rightarrow 1s_{1/2}$; $YL1$, $BaL1$, $CuL1 - 3s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ и отображают 3s –электроны атомов иттрия, бария, меди не принимающие участия в химических связях. Наблюдаемую зависимость структуры пленок от температуры осаждения можно объяснить следующим образом. Структурное формирование пленок YBaCuO происходит непосредственно в процессе напыления.

Список литературы

1. Ибраев Н.Х., Хуанбай Е. Влияние кислородной стехиометрии и микроструктуры на сверхпроводящие свойства пленок YBaCuO // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2007. – Т. 50, №4. – С. 41-45.
2. Ibraev N.Kh., Kuanbay E. Effect of oxygen stoichiometry and microstructure on superconducting properties of YBaCuO films // Russian Physics Journal. – 2007. – Vol. 50, №2. – P. 41-45.

А.В. ИВАЩЕНКО, М.А. ТАРАСОВА

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир,
Россия*

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ТИТАНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ В СРЕДЕ

В работе приведены результаты эксперимента по лазерной обработке мишени из титана при различных давлениях. Были получены фотографии с оптического микроскопа после обработки, так же по данным были построены графики зависимости глубины после воздействия от давления при различных режимах. Сделан вывод о том, какой режим является наиболее эффективным.

A.V. IVASHCHENKO, M.A. TARASOVA

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

LASER TREATMENT OF TITANIUM AT VARIOUS PRESSURES IN THE MEDIUM

The paper presents the results of an experiment on laser processing of a titanium target at various pressures. Photos were obtained with an optical microscope after processing, and data were also plotted for the dependence of depth after exposure to pressure under various conditions. The conclusion is made about which mode is the most effective.

В настоящее время большой практический интерес представляет собой процесс абляции материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов в различных средах [1, 2]. С помощью такой лазерно-плазменной обработки возможно получать различные структуры на поверхности материала, которые могут иметь значительное отличие от исходной поверхности и обладать улучшенными физико-механическими свойствами. В данной работе представлены результаты исследования процессов абляции мишени из титана в среде жидкого углеводорода – гексана при различных давлениях.

На каждом образце были сделаны 4 различных режима воздействия. Средняя мощность воздействия лазерного излучения составляла 1,5 Вт, частота следования импульсов 10 кГц. Были сделаны фотографии с оптического микроскопа обработанных образцов, при помощи которых можно наблюдать за изменением морфологии поверхности, при помощи которых были построены графики зависимости глубины образованных структур от давления для каждого режима обработки. На рисунке 1 представлен график для первого режима обработки.

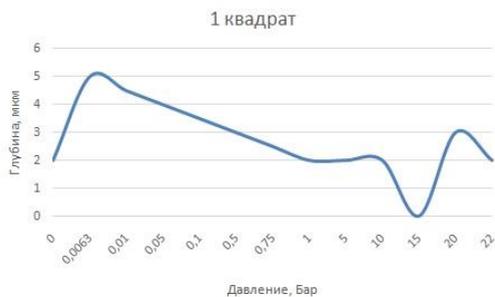


Рис. 1. График зависимости глубины образованной структуры от давления для режима сканирования со скоростью 10 мм/с

По полученным графикам можно заключить, что в основном, при увеличении значения давления эффективность абляции снижается, и глубина вовсе отсутствует, что может быть связано с изменением плотности среды обработки. Вследствие чего энергия, которая попадает в данную область, оказывается ограниченной в объеме. После обработки с режимами в 100 мм/с и 10имп/точ никаких значений глубины вовсе не наблюдалось, это может быть связано с тем, что при данных режимах в обрабатываемую область попадает очень малое значение энергии.

В результате проведения эксперимента так же можно заметить, что при увеличении давления жидкость кипит менее эффективно, снижение давления в сосуде способствует интенсивному кипению жидкости. При меньшем давлении происходит более интенсивная абляция обрабатываемого материала, соответственно, чем больше значение давления, тем более снижается эффективность данного процесса.

Список литературы

1. Фатхутдинов Т.З., Ягудин М.А., Галикеев Д.Р. Применение нанопорошков металлов для модификации резьбовых смазок // Научный форум: технические и физико-математические науки: сборник статей по материалам V международной заочной научно-практической конференции. – 2017. – С.43-49.
2. Попок В.Н. Применение нанопорошков металлов и неметаллов для регулирования скорости горения смесевых энергетических материалов на основе нитрата аммония // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 11. – С. 25-25.

Ш. М. ИСМАИЛОВ, В. Г. КАМЕНЕВ, Ю. Д. АРАПОВ
*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н. Л. Духова, г. Москва, Россия*

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННОГО И ПРОШЕДШЕГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В докладе представлено описание лазерно-оптических методов и аппаратуры для регистрации параметров лазерного излучения, прошедшего и рассеянного дисперсной средой. Результаты применения методов и созданной аппаратуры позволяют получить информацию о концентрации рассеивателей и их размерах при различной интенсивности процессов пыления в газодинамических экспериментах.

Sh. M. ISMAILOV, V. G. KAMENEV, Yu. D. ARAPOV

N. L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

REGISTRATION OF DISPERSION MEDIA PARAMETERS USING AN ANALYSIS OF SCATTERED AND PASSED LASER RADIATION

The report describes laser-optical methods, on the basis of which equipment is developed for recording the parameters of transmitted and scattered dispersed medium laser radiation. The results of the application on the methods and the developed equipment make it possible to obtain information on the concentration of scatterers and their sizes at various intensities of dusting processes in gas-dynamic experiments

В настоящее время изучение процессов образования дисперсной фазы, протекающих при ударно-волновом нагружении является актуальной задачей в области газодинамических исследований. При этом для регистрации движения поверхностей в основном используются оптические и интерферометрические методы [1, 2, 3]. Однако, при взаимодействии ударной волны с поверхностью образца и превышении пороговых значений давления наблюдаются процессы откола и микрокумуляции частиц пыли, приводящие к образованию металлических частиц. В начале движения поверхности образовавшиеся частицы обладают скоростями, превышающими скорость самой поверхности, в результате чего поверхность экранируется облаком данных частиц [4]. Образование облака дисперсной фазы существенно влияет на результаты исследования оптическими и интерферометрическими методами скорости движения именно поверхности, поскольку, во-первых – создаёт паразитный сигнал излучения, отражённого от пыли, и, во-вторых – экранирует поверхность от зондирующего излучения. Взрывные ударноволновые нагрузки могут приводить к деформации конструкции объекта, при этом скорость самого объекта может отличаться от скорости исследуемой поверхности, отколов и продуктов дисперсной фазы. Поскольку механизмы образования и параметры

дисперсной фазы в подобных условиях изучены в недостаточной мере, то это делает востребованными результаты настоящего исследования при создании специальных изделий. Существующие методы имеют ограниченную область применения, поскольку позволяет получить информацию только о некоторых параметрах пылевого облака. Для регистрации распределения частиц по размеру и плотности могут быть использованы методы когерентного обратного рассеяния (КОР) и рассеяние Ми, которые позволяют зондировать облако частиц дисперсной фазы на несколько порядков плотнее, чем другие оптические методы, так как свет в этом случае распространяется в режиме многократного рассеяния[5]. Благодаря этому использование представленных в докладе методов и аппаратуры, регистрирующих излучение, рассеянное средой, позволяет получить информацию о параметрах дисперсной среды при высокой интенсивности процессов пыления в газодинамических экспериментах.

Список литературы

1. В.Л. Кузьмин, В.П. Романов «Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах» // УФН т.166 (№3), Март 1996 г., С. 247 – 278.
2. D. S. Sorenson, P. Pazuchanics, R. P. Johnson [et al.] 2017 «Ejecta particle size measurements from the break-up of micro-jets in vacuum and helium gas using ultraviolet in-line Fraunhofer holography» // AIP Conf. Proc.1793, 100026.
3. D. Kroon, S. Lönn – «Utilizing enhanced backscattering for determination of scattering properties in turbid media» // Lund Reports in Atomic Physics, PHYM01, 20111, 2011.
4. M. M. Schauer, W. T. Buttler, D. K. Frayer [et al.] «Ejected Particle Size Distributions from Shocked Metal Surfaces» // J. Dynam. Behavior Mater. 2017. apr. T. 3, № 2. p. 217–224.
5. S. K. Monfared, W. T. Buttler, D. K. Frayer et al. «Ejecta particle size measurement Mie scattering in high explosive driven shockwave experiments» // J. Appl. Phys. 117, 223105 (2015).

А.Б. КЕНЕСБЕКОВ^{1,2}, Т.Т. РАХЫШОВ¹, Б.К. РАХАДИЛОВ¹

¹*Восточно-Казахстанский государственный университет*

им. С.Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

²*Восточно-Казахстанский государственный технический университет*

им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

МОДИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И СПОСОБА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

В работе обсуждены проблемы нанесения защитных покрытий способом воздушно-плазменного напыления. Рассмотрены оптимальные конструктивные узлы разработанного оборудования для воздушно-плазменного напыления, а также реализация конструктивно-технологических решений нового плазматрона.

A.B. KENESBEKOV^{1,2}, T.T. RAKHYSHOV¹, B.K. RAKHADILOV¹

¹*S. Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,*

²*D. Serikbayev East-Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

MODIFICATION OF EQUIPMENT AND METHOD FOR DEPOSITION COATINGS BY AIR-PLASMA SPRAYING

In this work discussed the problems of applying protective coatings by air plasma spraying. The optimal structural units of the developed equipment for air plasma spraying are considered, as well as the implementation of structural and technological solutions of the new plasma torch.

Современный этап развития техники характеризуется повышенным интересом к технологиям, обеспечивающим возможность модификации поверхностей конструкционных материалов, нанесения на них покрытий с защитными функциями [1,2]. В настоящее время для нанесения защитных покрытий все шире используется воздушно-плазменное напыление (ВПН). Существенным недостатком данной технологии является низкий КПД процесса, решение этой проблемы является актуальной задачей на сегодняшний день [2,3].

Целью данной работы является определение оптимальных конструктивных параметров схемы плазматрона для ВПН. Авторами данной работы была разработана и изготовлена установка для ВПН, которая состоит из плазматрона, системы подачи инертных газов аргона и воздуха, источника питания инверторного типа током 500 А, напряжением холостого хода 60 В, системы автономного охлаждения плазматрона.

Проведенный комплекс исследовательских работ выявил сложности получения качественных покрытий, к которым относится малый ресурс работы плазматрона в следствии прожига анода, плохая проходимость порошка сквозь распыляющие порошок каналы. Для их устранения была модифицирована

конструкция плазматрона. Разработана система ввода порошка непосредственно в транспортирующий газ (узел завихрения). Методом конечных элементов смоделирована, изготовлена и испытана система завихрения транспортирующего газа. За счёт смоделированной аэродинамики завихрения была получена длинная траектория частиц в области горения дуги и, как следствие, более высокий разогрев тугоплавких частиц. Вращающееся анодное пятно по внутренней стенке канала сопла предотвращает локальный прожиг, а также материал анода и прижим катода заменён на медь (марки М0), которая обладает высокой тепло- и электропроводностью по сравнению со сталью [4]. Покрытие из порошка SiC и TiN, наносилось с использованием установки ВПН. Напыление покрытий осуществлялось в режиме: скорость перемещения 20-30 мм/с, расстояние между плазматроном и изделием 40-45 мм, диаметр пятна напыления 10-15 мм. Оптимальные значения расхода транспортирующих газов и порошка, дистанция напыления были определены опытным путем на основе изучения адгезионной прочности и пористости покрытий. Температура нагрева деталей при напылении не превышает 150-200 °С. Модифицированная конструкция плазматрона, система ее бесконтактного возбуждения, система охлаждения, позволили получить тонкоплёночные покрытия на основе SiC и TiN удовлетворительного качества.

Реализация указанных мероприятий позволила наносить SiC и TiN покрытия на поверхности быстрорежущих сталей без потери качества, а также существенно улучшить производительность данной установки.

Список литературы

1. Skakov M., Rakhadilov B., Scheffler M., Bатырбеков E. Microstructure and tribological properties of electrolytic plasma nitrided high-speed steel // Materials Testing, 2015, - 57(4), с. 360-364
2. Juan Pablo Trelles, E. Pfender, et al., Plasma Chem. Plasma Process., Vol. 26, p. 557, 2006.
3. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура// Киев: Техника. 1971. 164 с
4. E. Meillot, D. Guenadou, et al., Plasma Chem Plasma Process, Vol. 28, p. 69, 2008.

А.В. КОЛЧИН¹, Д.В. ШУЛЕЙКО¹, С.В. ЗАБОТНОВ¹, Л.А. ГОЛОВАНЬ¹,
Д.Е. ПРЕСНОВ¹, Т.П. КАМИНСКАЯ¹, С.А. КОЗЮХИН^{2,3}, П.И.
ЛАЗАРЕНКО⁴, П.К. КАШКАРОВ¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

³Томский государственный университет

⁴Московский институт электронной техники

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА В АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ Ge₂Sb₂Te₅, ОБЛУЧЕННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния света были исследованы тонкие аморфные пленки Ge₂Sb₂Te₅, облученные фемтосекундными лазерными импульсами. Обнаружено, что в результате такого воздействия в объеме пленок возникают фазовые изменения, а также формируются периодические структуры на поверхности.

A.V. KOLCHIN¹, D.V. SHULEIKO¹, S.V. ZABOTNOV¹, L.A.
GOLOVAN¹, D.E. PRESNOV¹, T.P. KAMINSKAYA¹, S.A.
KOZYUKHIN^{2,3}, P.I. LAZARENKO⁴, P.K. KASHKAROV¹

¹M.V. Lomonosov Moscow state university

²N.S. Kurnakov Institute of general and inorganic chemistry of the RAS, Moscow, Russia

³Tomsk state university

⁴Moscow institute of electronic technology

SURFACE AND PHASE MODIFICATIONS IN AMORPHOUS Ge₂Sb₂Te₅ THIN FILMS IRRADIATED BY FEMTOSECOND LASER PULSES

Thin amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films irradiated by femtosecond laser pulses were studied by atomic-force and scanning electron microscopies, as well as Raman spectroscopy. Formation of periodic surface structures and phase changing was observed in modified films as a result of such laser annealing.

Повышенный интерес к халькогенидам Ge₂Sb₂Te₅, наблюдаемый последнее время, связан с созданием на основе данных материалов технологии перезаписываемой и энергонезависимой памяти [1]. При этом, запись информации в структурах на основе Ge₂Sb₂Te₅ может быть реализована посредством облучения фемтосекундными лазерными импульсами [2]. Также необходимо отметить возможность создания метаповерхностей на основе упомянутого халькогенида методом фемтосекундной лазерной обработки [2].

Исходные образцы аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 200 нм были осаждены на многослойную подложку $\text{c-Si/SiO}_2/\text{TiN/W}$ методом магнетронного распыления. Последующее облучение производилось Cr:Forsterite лазером (1250 нм, 0.14-1.18 Дж/см², 125 фс, 10 Гц) в сканирующем режиме. Структурные свойства обработанных пленок исследовались методами атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Фазовый состав анализировался методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с использованием длины волны возбуждения 488 нм.

На облученной поверхности обнаружены одномерные структуры с периодом 1.1 ± 0.2 мкм и высотой 10-20 нм, формирование которых, вероятнее всего, обусловлено интерференцией падающего лазерного излучения и индуцированными им поверхностными плазмон-поляритонами [3]. С повышением плотности энергии лазерных импульсов наблюдается образование островковых пленок с поперечным размером 0.3-0.5 мкм в результате возможной лазерно-индуцированной самосборки.

Анализ спектров КРС подтверждает аморфную структуру исходных образцов (полоса $100\text{-}170$ см⁻¹ с максимумом при 156 см⁻¹, что соответствует Sb_2Te_3). В то же время для облученных образцов наблюдаются изменения спектров КРС, свидетельствующие об их кристаллизации, что выражается в смещении максимума полосы $100\text{-}170$ см⁻¹ и появлению линий GeTe_4 (130 см⁻¹) и SbTe_3 (146 см⁻¹). Повышение плотности энергии лазерных импульсов приводит к увеличению интенсивности линии GeTe_4 в обработанных областях, что говорит о формировании гранецентрированной кубической структуры в кристаллическом $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Таким образом, обнаружено, что в результате фемтосекундного лазерного воздействия происходит как формирование поверхностных структур с периодом 1.1 ± 0.2 мкм, так и кристаллизация в облученных областях аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Данный метод обработки может позволить объединить технологии фазовой и оптической памяти.

Список литературы

1. F.C. Mocanu et al. // J. Phys. Chem. B 2018. V. 122 (38) P. 8998-9006.
2. S. Kozyukhin et al. // Opt. Laser. Tech. 2019. V. 113. P. 87-94.
3. D.V. Shuleiko et al. // Laser Phys. Lett. 2018 V. 15 P. 056001-1-8.

Ю.В. КОЧЕТКОВ¹, Ф.А. КОРНЕЕВ^{1,2}, Т. ПИСАРЧУК³,
Ж.Ж. САНТОС⁴, М. КАЛАЛ⁵, С.Ю. ГУСЬКОВ^{2,1},
Т. ЧУДАКОВСКИ³, А.П. КУЗНЕЦОВ¹

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

² *Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

³ *Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза, Варшава, Польша*

⁴ *Центр применения интенсивных лазеров, Университета Бордо, ИЦНИ, Франция*

⁵ *Факультет ядерной физики Чешского технического университета, Прага*

ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Рассмотрено влияние излучения плазмы, эффекта Коттона-Мутона, несимметрии распределения плотности плазмы на распределения магнитного поля и плотности тока, полученных при обработке данных комплексной интерферометрии. Проведена оценка погрешностей и предложены способы совершенствования методов обработки данных.

IU.V. KOCHETKOV¹, PH.A. KORNEEV^{1,2}, T. PISARCZYK³,
J.J. SANTOS⁴, M. KALAL⁵, S.YU. GUS'KOV^{2,1},
T. CHODUKOWSKI³, A.P. KUZNETSOV¹

¹ *National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

² *P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia*

³ *Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Warsaw, Poland*

⁴ *University of Bordeaux, CNRS, CEA, CELIA, 33405 Talence, France*

⁵ *Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, ČVUT, Prague, Czech Republic*

PHYSICAL AND MATHEMATICAL PROBLEMS IN COMPLEX INTERFEROMETRY DATA PROCESSING

The influence of plasma radiation, the Cotton-Mouton effect, the asymmetry of plasma density distribution on the magnetic field and current density distributions, obtained by processing of the complex interferometry data, is considered. The corresponding errors are estimated and some ways for improving the data processing method are proposed.

Математически метод комплексной интерферометрии был предложен довольно давно [1], однако его практическая реализация оказалась затруднена. По сравнению с классическими поляриметрией и интерферометрией комплексная интерферометрия является более информативной – она позволяет получить информацию о магнитном поле непосредственно из фазово-амплитудного анализа одного изображения. Тем не менее, из-за сложных математических преобразований, необходимых для обработки данных, даже небольшие искажения при их извлечении могут привести к большим ошибкам в

распределении магнитного поля, и, соответственно, в распределении плотности тока.

Обработку комплексных интерферограмм можно разбить на несколько этапов: извлечение сдвига фаз, извлечения угла поворота плоскости поляризации излучения в плазме, математические преобразования полученных данных. Первый этап осуществляется стандартными методами и имеет довольно высокую точность. Второй осуществляется с помощью преобразования Фурье комплексной интерферограммы для фильтрации частот, соответствующих интерференционным полосам и получения изображения с модуляцией яркости только за счет поворота плоскости поляризации в плазме и эффекта Малюса. Использование данного метода может внести в измеряемые данные искажения - в частности, извлеченная ось симметрии угла поворота плоскости поляризации даже в идеальных условиях (с синтезированными изображениями без каких-либо дополнительных эффектов) может на несколько мкм отличаться от оси симметрии плазмы. Оси, извлеченные из экспериментальных изображений, могут отличаться еще сильнее из-за ряда физических эффектов, например, эффекта Коттона-Мутона. Однако в реальности оси должны совпадать, поэтому необходимо каким-либо образом компенсировать полученное различие. В отсутствие такой компенсации применение последующих математических преобразований, предполагающих совпадение осей, приводит к качественным ошибкам в интерпретации данных.

С использованием синтезированных интерферограмм были проведены оценки точности восстановления заданного магнитного поля при добавлении свечения плазмы и эффекта Коттона-Мутона, при наклоне распределения плазмы, при добавлении различных шумов, построены зависимости точности восстановления от силы данных эффектов. Было предложено несколько усовершенствований в метод обработки данных, при использовании которых точность анализа существенно возрастает.

Список литературы

1. Kalal M. Czechoslovak Journal of Physics. – 1991. – Vol.41, №8. – P.743.

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ

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

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С ДИСПЕРСИЕЙ КАСКАДНО ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ДЛИНЫ

Рассмотрена генерация последовательностей ультракоротких импульсов из квазинепрерывной модулированной волны, распространяющейся в световодах, обладающих различными профилями зависимости дисперсии от длины, вследствие индуцированной модуляционной неустойчивости волны.

I.O. ZOLOTOVSKII, V.A. LAPIN, D.I. SEMENTSOV

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

MODULATION INSTABILITY OF WAVE PACKETS PROPAGATING IN A FIBER WITH A DISPERSION CASCADE DEPENDING ON THE LENGTH

We investigated the generation of sequences of ultrashort pulses from a quasicontinuous modulated wave propagating in fibers with different profiles of the dependence of dispersion on length, due to the induced modulation instability of the wave.

Модуляционная неустойчивость (МН) – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 3]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = 0 \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр нелинейности. В работе рассматривалась ДГС вида:

$$d_2 = d_{20} \cdot \begin{cases} 1, & z < z_0 \\ f(z), & z \geq z_0 \end{cases} \quad (2)$$

На **рис. 1** приводятся зависимости максимума слабомодулированной волны вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + 0.01 \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)] \quad (3)$$

полученные путем численного решения уравнения **Ошибка! Источник ссылки не найден.** методом SSF [1]. При следующих значениях параметров: начальной мощности $P_0 = 1$ Вт, длине световода $L = 1000$ м, начальной ДГС $d_{20} = -10^{-26}$ с²/м, дисперсии на выходе из световода $d_2(L)/d_{20} = 0.1$, параметре нелинейности $R = 10^{-2}$ (Вт·м)⁻¹, частоте модуляции

$$\Omega_{\text{mod}} = \sqrt{2\gamma P_0 / |d_{20}|} \quad \text{и} \quad \text{при}$$

$$f(z) = \exp(-b_e z); (1 - b_l z); (1 + b_h z)^{-1}; \exp(-b_g z^2) - \text{кривые (1;2;3;4)}.$$

Из **рис. 1** видно, что наибольшие пиковые мощности генерируемых импульсов в случае каскадной зависимости ДГС достигаются при экспоненциальной и гиперболической профилях дисперсии.

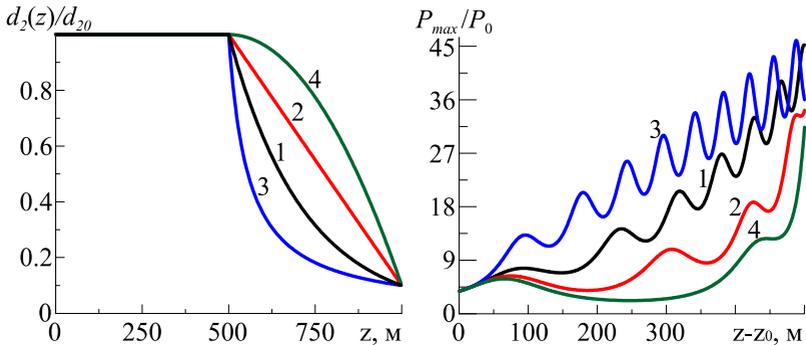


Рис. 1. Нормированные зависимости дисперсии (**лев. рис.**) и максимума модулированной волны (**прав. рис.**) от длины световода z .

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-32-00957 и 19-42-730013.

Список литературы

1. Agrawal G. Nonlinear fiber optics (Springer, 2007).
2. У. Г. Ахметшин, В. А. Богатырев, А. К. Сенаторов, А. А. Сысолятин, М. Г. Шальгин// Квантовая электроника, Т. 33, № 3, С. 265–267, 2003.
3. I.O. Zolotovskii, V.A. Lapin, D.I. Sementsov, A.A. Fotiadi, S. V. Popov // Opt. Commun. V. 426, P. 333–340, 2018.

**К.С. ЛУКЪЯНОВ, А.В. МИХАЙЛЮК, Т.В. КАЗИЕВА,
А.П. КУЗНЕЦОВ, К.Л. ГУБСКИЙ**

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ И ЛЮМИНИСЦЕНЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В КЕРАМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ АКТИВНЫХ СРЕДАХ

Использование легированной керамики в качестве активной среды является перспективным решением в конструировании мощных лазерных установок. Была разработана оптическая система для исследования зависимости спектров поглощения и люминисценции от температуры в керамических лазерных активных средах. Система позволяет проводить измерения в диапазоне температур от 77⁰К до 300⁰К.

**K.S. LUKYANOV, A.V. MIKHAYLYUK, T.V. KAZIEVA,
A.P. KUZNETSOV, K.L. GUBSKIY**

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

DEVELOPMENT OF THE OPTICAL SCHEME FOR TEMPERATURE-DEPENDENT ABSORPTION AND EMISSION SPECTRA MEASUREMENT OF OPTICAL CERAMIC

Usage of doped ceramics as active laser medium is a perspective solution for the design of powerful laser facilities. We have developed optical system for the ceramics active media characteristics research, namely absorption spectrum on temperature dependence. System allows to conduct experiments in 77⁰-300⁰ K temperature range.

В настоящее время в качестве активной среды твердотельных лазеров используются монокристалл или легированное активаторными ионами стекло. Тем не менее, такие среды имеют ряд недостатков, связанных с технико-экономическими и с эксплуатационными параметрами. К недостаткам монокристаллических сред можно отнести малую скорость роста кристаллов, большие потери материала при изготовлении заготовки, сложность с внедрением большого количества ионов-активаторов. Недостатками стекол является меньшие значения сечения стимулированного излучения, меньшая теплопроводность и худшая термостойкость. Подобных недостатков лишены активные среды, выполненные из оптической керамики, что обуславливает возрастающий интерес к подобным материалам.

Для использования оптической керамики в качестве активной среды лазерных установок необходимо знать зависимость от температуры таких параметров как: сечение вынужденного излучения, время жизни возбужденного

уровня и пороговой мощности накачки. Информация о данных параметрах содержится в спектрах поглощения и люминесценции.

Для исследования различных образцов активных сред на основе керамики был разработан диагностический комплекс. Образец помещается в криостат и исследуется при низких температурах и давлениях (77 К, 10^{-4} Па). Первая диагностика предназначена для исследования спектра поглощения керамики. Белый свет подается от источника на образец по оптическому волокну, фокусируется на образце, собирается и направляется другим оптоволоком к спектрометру. Зеркальная оптическая система выстроена таким образом, чтобы скомпенсировать aberrации и получить максимальный светосбор. Вторая диагностика предназначена для активного воздействия на образец излучением лазерного диода и регистрации интенсивности и спектра люминесценции образца оптической керамики. Для обеспечения необходимых параметров пучков схемы обеих диагностик были рассчитаны в ZEMAX.

К.С. ЛУКЪЯНОВ, Т.В. КАЗИЕВА, А.П. КУЗНЕЦОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ

Исследованы влияние заболеваний на форму капилляров и параметры циркулирующей в капиллярных структурах жидкости с примесями. Разработан спекл-интерферометр для неинвазивной диагностики параметров микроциркуляции крови.

K.S. LUKYANOV, T.V. KAZIEVA, A.P. KUZNETSOV

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

DEVELOPMENT OF THE LASER SPECKLE-IMAGING SYSTEM FOR VELOCITY MEASUREMENT OF VASCULAR BLOOD FLOWS

Researched disease-dependent capillaries shapes and vascular blood flows parameters. Laser speckle-imaging system for velocity measurement of vascular blood flows was developed.

Наблюдение за состоянием микроциркуляции крови является одной из важных задач современной медицинской диагностики. Это связано с тем, что многие заболевания, такие как заболевания сердечно-сосудистой системы, атеросклероз, сахарный диабет, хроническая венозная недостаточность и другие, вызывают функциональные и морфологические изменения в микроциркуляторном русле. Нарушение микроциркуляции/макроциркуляции составляют основу развития таких заболеваний как гастроинтестинальные геморрагии, артериальная гипертония, геморрагический панкреатит, инфаркт миокарда, инсульты и т.д.

В настоящее время исследования микроциркуляции проводятся в большинстве случаев биопсийным методом. Данные, полученная подобным образом, содержат информацию о состоянии микроциркуляции только в конкретной точке и не могут отражать динамических процессов [1].

К наиболее эффективным диагностическим методам определения основных параметров микроциркуляции относятся методы, основанные на динамическом рассеянии света, а также методы, основанные на принципах оптической когерентной томографии. Но они имеют ряд существенных ограничений, например, недостаточно высокое пространственное и временное разрешение, ограниченность информации о потоке частиц, особенно при сканировании по глубине биоткани.

Методы статистического и корреляционного анализа динамических спеклов широко применяются в материаловедении, медицине, биологии, химии и других областях современной науки. Данные методы, предполагающие анализ флуктуационной составляющей интенсивности лазерного излучения, рассеянного зондируемым объектом, базируются на совокупности фундаментальных и прикладных результатов, полученных в последние десятилетия в статистической оптике и оптике случайно-неоднородных сред [2].

Совмещение методов динамического рассеяния света (ДРС) и микроскопии позволяет получить высокоэффективный инструмент для определения параметров микроциркуляции неинвазивным способом. Таким образом создание спекл-интерферометра позволит проводить мониторинг микроциркуляторного русла.

Работа выполнена при поддержке фонда «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках программы УМНИК-2018

Список литературы

1. Тимошина П. А. Мониторинг микроциркуляции крови методом спекл-контрастной визуализации в исследованиях модельных патологий на животных : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 03.01.02 / Тимошина Полина Александровна; [Место защиты: Саратов, нац. исслед. гос. ун-т им. Н.Г. Чернышевского]. - Саратов, 2016. - 102 с. : ил. Биоптика.

2. Виленский М. А. Спекл-коррелометрия полного поля: методы и приложения в диагностике случайно-неоднородных сред : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.21 / Виленский Максим Алексеевич; [Место защиты: Саратов, гос. ун-т им. Н.Г. Чернышевского]. - Саратов, 2010. - 175 с. : ил. Лазерная физика.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ МОД В ДВУХСЛОЙНОМ МУЛЬТИМОДАЛЬНОМ ПОКРЫТИИ, ПОЛУЧЕННОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

В статье установлено периодическое изменение микротвердости в поперечном сечении двухслойного мультимодального покрытия, полученного лазерной наплавкой сплава на основе никеля и бронзы. Показано влияние режимов лазерной наплавки на микротвердость мод двухслойного покрытия.

O.G. DEVOJNO, N.I. LUTSKO, A.S. LAPKOVSKIJ

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

PATTERNS OF MODES MICROHARDNESS CHANGING IN TWO-LAYER MULTIMODAL COATING OBTAINED BY LASER CLADDING

The article establishes a periodic change in microhardness in the cross section of a two-layer multimodal coating obtained by laser cladding of a nickel based alloy and bronze. The effect of laser cladding parameters on the microhardness of the coating modes is shown.

Известно, что особенно высокие физико-механические свойства показывают композиционные мультимодальные покрытия [1]. Такие покрытия могут быть построены лазерной наплавкой чередующихся валиков из разнородных материалов. Схема подобного покрытия из никелевого сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 показана на рис. 1.

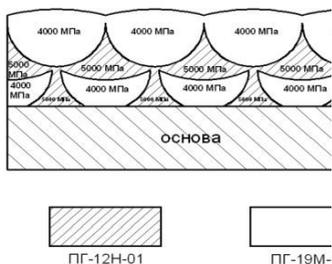


Рис. 1. Схема поперечного сечения двухслойного покрытия



Рис. 2. Распределение микротвердости в поперечном сечении

В поперечном сечении двухслойного мультимодального покрытия наблюдается периодическое изменение микротвердости при переходе из валиков (мод) бронзы ПГ-19М-01 в валики (моды) сплава ПГ-12Н-01, и так

далее, по всему поперечному сечению покрытия в направлении параллельно основе (рис. 2) Варьируя величину шагов наплавки одноименных/разноименных валков можно добиться разной периодичности изменения микротвердости и других свойств покрытия.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости средней микротвердости мод сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в двухслойном мультимодальном покрытии от скорости наплавки и шага наплавки валков. С увеличением скорости наплавки мод покрытия (рис. 3) величина микротвердости обеих мод уменьшается, а затем несколько увеличивается. Уменьшение величины микротвердости до скорости наплавки сплава/бронзы 120/180 мм/мин связано с уменьшением энерговклада в покрытие и с неполным сплавлением материалов валков по границам зерен. Дальнейшее увеличение микротвердости связано с фиксацией в материалах мод все большего количества высокотемпературных твердых фаз. При небольших шагах наплавки одноименных/разноименных валков в покрытии за счет хороших условий нагрева создаются условия для прочного сплавления материалов валков по границам зерен. При увеличении шагов наплавки до 2,4/1,2 мм повторные нагревы покрытия происходят реже. Начинает сказываться неполное сплавление материалов мод по границам зерен, приводящее к уменьшению величины микротвердости.

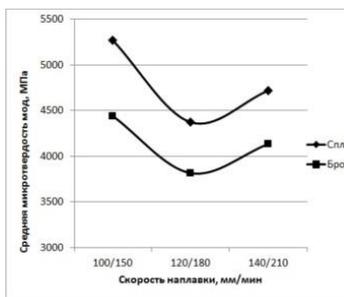


Рис. 3. Зависимость микротвердости мод покрытия от скорости наплавки

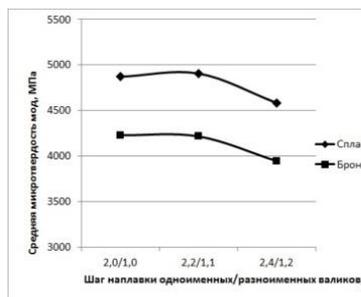


Рис. 4. Зависимость микротвердости мод покрытия от шага наплавки

Список литературы

1. A. Gilewicz, R. Olik, L. Szpraga, J. Ratajski. – The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel // Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 27-43.

П.А. ПАЛКИН¹, А.Б. ЛЮХТЕР¹, Ю.А. ЛЮТИКОВ²

1. Владимирский государственный университет ВлГУ имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия

2. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ РИСУНКА ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ГОМОГЕННЫХ СТРУКТУР ИТТЕРБИЕВЫМ ВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРОМ

В докладе представлены результаты формирования рисунка из пересекающихся полос термоупрочнения, на рабочей поверхности детали вал-шестерня. Закалка осуществлялась излучением иттербиевого волоконного лазера. Представлены результаты металлографического исследования.

P.A. PALKIN¹, A.B. LYUKHTER¹, Y. A. LYUTIKOV²

¹Vladimir state university named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

FORMATION OF A SURFACE HARDENING DRAWING OF HOMOGENEOUS STRUCTURES BY AN YTTERBIUM FIBER LASER

The report presents the results of the formation of a pattern of intersecting heat-strengthening strips on the working surface of the pinion shaft part. Hardening was carried out by radiation from a ytterbium fiber laser. The results of metallographic researches are presented.

В технологическом процессе изготовления деталей типа «зубчатые передачи» предусмотрены термические операции, связанные как с объемной, так и с поверхностной закалкой. В то время как объемная закалка позволяет получить требуемые механические характеристики деталей в целом, поверхностная закалка, направленная на достижение высокого качества поверхностного слоя по прочности и износостойкости, связана с множеством технологических трудностей. Конвенциональные методы поверхностной закалки такие как ТВЧ, имеют серьезный недостаток – неравномерная глубина упрочнения, формирующаяся при незначительных нарушениях технологического регламента, либо сложной формы зубчатого венца, что приводит к формированию поля закалочных структур на глубину более допустимых (свыше 2 мм). Широкое поле закалочных структур приводит к формированию микротрещин в результате высоких внутренних напряжений, а также к разрушению изделия в целом.

Технология лазерной закалки позволяет избежать приведенных выше серьезных нежелательных явлений, за счет как самого способа формирования, так и за счет подбора оптимальных режимов лазерной обработки.

Процесс лазерной закалки обрабатывался на поверхности образцов из среднеуглеродистой низколегированной конструкционной стали 40ХН2МА. Дорожки термоупрочнения формировались отдельно, с перекрытием и с пересечениями под определенными углами [1]. В процессе обработки режимы термоупрочнения были исключены такие влияния как: оплав, трещины и коробление.

По результатам исследования было установлено, что оптимальные значения твердости рабочей поверхности достигаются при пересечении дорожек упрочнения под углом 60°C и формировании «сетки термоупрочнения». Значения твердости термоупрочнения в дорожке, составили $\sim 53 \text{ HRC}$, в то время как в областях между дорожками упрочнения твердость составила $\sim 47 \text{ HRC}$. Создание сетки на рабочей поверхности изделия позволяет увеличить маслостойкость, снизить трение при сохранении высоких прочностных характеристик, обеспечивающихся несплошным полем разнородных закалочных структур.

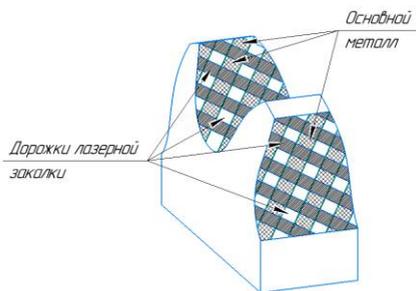


Рис. 1. Схематическое изображение дорожек упрочнения на валу

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 000 с.: ил
2. Райцес В.Б. Термическая обработка. В помощь рабочему-термисту. М.: Машиностроение, 1980 г. 192 с.: ил.

А.Н. МАРЕСЕВ^{1,2}, С.Ф. УМАНСКАЯ¹, В.С. ГОРЕЛИК¹,
А.Д. КУДРЯВЦЕВА¹, А.В. СКРАБАТУН¹, М.А. ШЕВЧЕНКО¹,
Н.В. ЧЕРНЕГА¹

¹Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия

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

ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В СУСПЕНЗИИ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ АЛМАЗА

Представлены результаты первого экспериментального наблюдения вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния и многофотонного возбуждения отрицательно заряженных одиночных NV-центров свечения в суспензии субмикронных частиц алмаза в этаноле. Обнаружены стоксова и антистоксова компоненты ВКР с частотным сдвигом 1332 см^{-1} , соответствующим основной оптической моде кристалла алмаза.

A.N. MARESEV^{1,2}, S.F. UMANSKAYA¹, V.S. GORELIK¹,
A.D. KUDRYAVTSEVA¹, M.A. SHEVCHENKO¹, A.V. SKRABATUN¹,
N.V. TCHERNIEGA¹

¹P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

STIMULATED RAMAN SCATTERING IN SUSPENSION OF SUBMICRON DIAMOND PARTICLES

We report on the first experimental observation of stimulated Raman scattering (SRS), stimulated low-frequency Raman scattering and multiphoton excited negatively-charged single nitrogen-vacancy (NV-) centers luminescence in ethanol suspension of submicron diamond particles. The Stokes and anti-Stokes SRS components with a frequency shift of 1332 cm^{-1} , corresponding to the fundamental optical mode of diamond crystal were observed.

Алмаз обладает уникальными физическими свойствами: большим коэффициентом усиления комбинационного рассеяния (КР), большим частотным сдвигом КР (1332 см^{-1}), самой высокой теплопроводностью среди всех известных материалов, низким коэффициентом теплового расширения и прозрачностью в спектральном диапазоне от 230 до 2500 нм.

Целью данной работы было продемонстрировать возможность использования суспензии субмикронных частиц алмаза в качестве активной среды.

Алмазные частицы размером 250 нм были получены синтезом при высоких температурах и давлениях (НРПТ). Они исследовались в виде порошка, пасты на

масляной основе и в виде суспензии в этаноле. Распределение частиц по размерам в суспензии было получено методом динамического рассеяния света.

Спонтанное комбинационное рассеяние света возбуждалось излучением непрерывного лазера с длиной волны генерации 785 нм и мощностью 100 мВт, ВКР - импульсами рубинового лазера длительностью 20 нс с длиной волны 694.3 нм, максимальной энергией 0.4 Дж и шириной линии 0.015 см^{-1} . На Рис.1 представлен спектр ВКР в суспензии субмикронных частиц алмаза в этаноле.

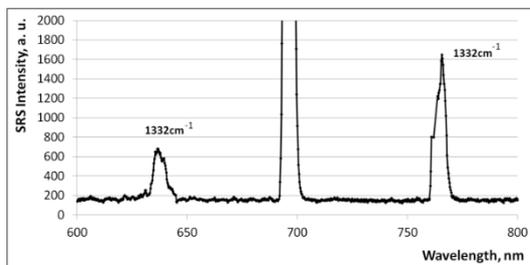


Рис. 1. Спектр ВКР в суспензии субмикронных частиц в этаноле.

Спектр содержит стоксову и антистоксову компоненты с частотным сдвигом 1332 см^{-1} , соответствующим основной оптической моде кристалла алмаза. При значительном превышении порога спектр в антистоксовой области содержит дополнительные компоненты, обусловленные многофотонным возбуждением люминесценции отрицательно заряженных одиночных NV-центров.

С помощью интерферометра Фабри-Перо была зарегистрирована стоксова компонента вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния света с частотным сдвигом 15 ГГц (0.5 см^{-1}).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 18-02-00181, 18-32-00259, 19-02-00750-а, 19-02-00440-а).

Е.Д. МАСЛОВА¹, Д.С. ЧУЧЕЛОВ², В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В АТОМАХ ЦЕЗИЯ

Исследовано влияние мощности излучения накачки и отстройки частоты детектирующего излучения от атомной линии ^{133}Cs на амплитуду и ширину магнитного резонанса с целью улучшения чувствительности магнитометра. Оптимальные отстройка частоты детектирующего излучения и температура ячейки в сенсоре датчика составили ~ 30 ГГц и 100°C соответственно. Для кубической ячейки объемом $0,17\text{ см}^3$ при температуре 100°C при давлении азота 56 Торр наблюдалось уменьшение ширины линии магнитного резонанса при увеличении мощности накачки в диапазоне 300-500 мкВт вследствие подавления спин-обменного уширения.

E.D. MASLOVA¹, D.S. CHUCHELOV², V.L. VELICHANSKY^{1,2}

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

²The P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

OPTIMIZATION OF CHARACTERISTICS OF MAGNETIC RESONANCE IN CESIUM ATOMS

To improve the sensitivity of a magnetometer the effect of the pump-laser power and the detuning of the probe-laser frequency from the ^{133}Cs atomic line on the amplitude and width of the magnetic resonance (MR) is studied. The optimal detuning of the frequency of the probe laser and the cell temperature in the sensor are 30 GHz and 100°C , respectively. For a cubic cell with Cs and N_2 (56 Torr) and the volume of 0.17 cm^3 , a decrease in the MR linewidth was observed with an increase in the pump power in the range of 300–500 μW (at 100°C) due to suppression of spin-exchange broadening.

Эффективным методом исследования головного мозга человека в научных и медицинских целях является регистрация пространственных и временных вариаций его магнитного поля. Поскольку это поле лежит в диапазоне 10-1000 фТл, требуется высокая вариационная чувствительность магнитометра, которая определяется шириной магнитного резонанса (МР) и отношением сигнала к шуму [1]. Исследовался МР в кубической ячейке с внутренней стороной 5,5мм, содержащей 56 Торр азота и цезий, в магнитном поле 10мкТл. МР регистрировался как функция фарадеевского вращения поляризации детектирующего излучения от частоты переменного РЧ поля (в окрестностях частоты 35 ГГц). Форма МР близка к дисперсионной лоренцевской кривой

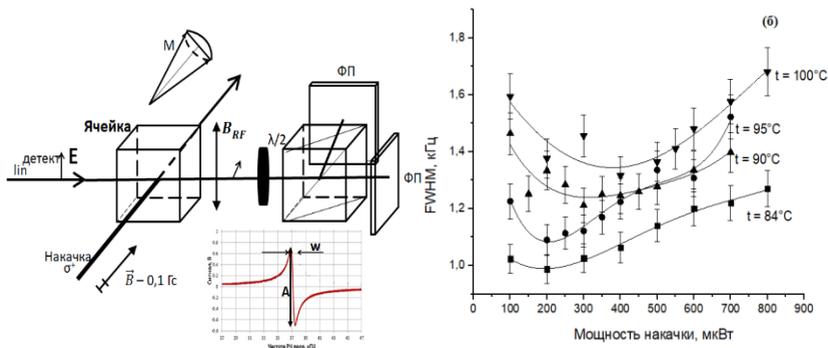


Рис. 1. Схема сенсора датчика и форма МР(а); зависимость ширины МР от мощности накачки (б).

(врезка на Рис.1.) Крутизна резонанса определяется отношением размаха дискриминационной кривой к ее ширине (A/w). Лазер накачки используется для поляризации атомного ансамбля (Рис.1а). Лазер детектирования служит для измерения фарадеевского вращения плоскости поляризации в ячейке, которое пропорционально измеряемому полю.

При увеличении температуры ячейки крутизна МР монотонно увеличивается. Максимальная температура ($\approx 100^\circ\text{C}$) ограничена требованиями безопасности пациента. В зависимости крутизны магнитного резонанса, от отстройки частоты зондирующего лазера относительно атомной линии, наблюдался максимум при отстройке $\sim 30\text{ГГц}$ в длинноволновую область. Наличие его вызвано ростом пропускания и уменьшением дисперсии при увеличении отстройки.

При низких мощностях накачки основной вклад в ширину резонанса вносит спин-обменное уширение. При увеличении мощности накачки в диапазоне 300-500мкВт наблюдается сужение ширины резонанса для исследуемых температур. Этой области соответствует подавление спин-обменного уширения из-за оптической накачки большей части атомов на крайний магнитный подуровень. При более высоких значениях мощности накачки ширина резонанса начинает увеличиваться из-за полевого уширения (рис.1б).

Список литературы

1. Tierney, T., Holmes, N., Mellor, S., et al. (2019). Optically pumped magnetometers: From quantum origins to multi-channel magnetoencephalography. *Neuroimage*, 199, 598-608.

А.И. МИСЬКЕВИЧ, А.В. ПОДКОПАЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

УСИЛЕНИЕ И СВЕРХСВЕТИМОСТЬ НА В-Х И С-А ПЕРЕХОДАХ ЭКСИМЕРНЫХ МОЛЕКУЛ ПРИ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКЕ

Приводятся результаты экспериментальных исследований люминесценции плотных газовых смесей Ar-Xe-CCl₄ и Ar-Xe-C₂HBrClF₃ (фторотан), возбуждаемых продуктами ядерной реакции ²³⁵U(n,f). Измерены спектральные, временные и генерационные характеристики таких газовых смесей с концентрацией ~10¹⁵ mol/cm³ молекул CCl₄ и C₂HBrClF₃. В этих смесях при удельном энерговыделении в газ ~2кВ/см³ наблюдается усиление излучения В-Х полос молекул XeCl*(λ_{max}=308 nm), XeBr*(λ_{max}=282 nm), и сверхсветимость на С-А переходе молекулы XeCl*(λ_{max}=352 nm)

A.I.MIS'KEVICH, A.V. PODKOPEV

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

AMPLIFICATION AND SUPER-LUMINOSITY ON B-X AND C-A TRANSITIONS OF EXCIMER MOLECULES XeCl* AND XeBr* EXCITED ONLY NUCLEAR PUMPING

The results of experimental studies of Ar-Xe-CCl₄ and Ar-Xe-C₂HBrClF₃ (fluorotane) dense gas mixtures luminescence excited by the products of the nuclear reaction ²³⁵U (n, f) are presented. The spectral, temporal, and lasing characteristics of such gas mixtures with a concentration of ~ 10¹⁵ mol / cm³ of CCl₄ and C₂HBrClF₃ molecules were measured. At a specific energy deposition into the gas of ~ 2kW / cm³, an increase in the emission of the B-X bands of the XeCl * molecules (λ_{max} = 308 nm), XeBr * (λ_{max} = 282 nm), and super-luminosity at the C-A transition of the XeCl * molecule (λ_{max} = 352 nm) were received.

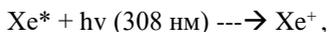
Плотные (~1атм) ксенон-содержащие газовые смеси с низким содержанием молекул донора атомов галогена обладают высокой эффективностью образования эксимерных молекул XeCl*, Xe₂Cl*, XeBr* и Xe₂Br*. Основным механизмом, определяющим кинетику образования эксимерных молекул ядерными частицами в этих плотных (~1атм) газовых смесях с низким содержанием молекул донора CCl₄, являются реакции ион-ионной рекомбинации положительных ионов Xe⁺ и Xe₂⁺, образующихся в газовой смеси, с отрицательными ионами Cl⁻ и Br⁻. Это связано со свойствами трековой структуры плазмы, когда вся кинетическая энергия заряженной частицы в плотной среде выделяется в виде продуктов ионизации в узкой области пространства вдоль траектории движения частицы с (характерный размер трека - диаметр ~1мкм и длина ~ нескольких см). При этом состав образующейся трековой плазмы (концентрация и температура электронов в треке, концентрация положительных ионов), слабо зависит от удельного энерговыделения в газ. Характерная величина концентрации электронов в треке – 10¹³-10¹⁴ см⁻³

[При наличии в смеси электроотрицательного газа (например CCl_4 , SF_6 , $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$) трековая плазма быстро становится безэлектронной из-за эффективного прилипания электронов к молекулам донора атомов галогена. Поэтому концентрации молекул галогеносодержащего донора должны быть сравнимые с концентрацией электронов в треке ядерной частицы, а избыточная концентрация донора в смеси будет вызывать сильное тушение эксимерной люминесценции.

Для проведения лазерных экспериментов с этими средами была изготовлена кювета безоконной конструкции из нержавеющей стали $\text{Ø}50 \times 1000$ мм, внутри которой находилась трубка-вкладыш $\text{Ø}27 \times 700$ мм со слоем $^{235}\text{U}_3\text{O}_8$ толщиной 5 мг/см^2 . Резонатор лазера образовывали два многослойных диэлектрических сферических зеркала на кварцевой подложке. Лазерная кювета размещалась непосредственно между двух активных зон импульсного ядерного реактора БАРС-6. Энерговклад осколков деления в газовую среду за всё время нейтронного импульса накачки длительностью 200 мкс составлял $\sim 400 \text{ мДж/см}^3$. Кювета заполнялась газовыми смесями Ar-Xe-CCl_4 и $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$, содержащими ($380 \div 760$ Торр) Ar , ($15 \div 30$ торр) Xe и 50 мТорр CCl_4 или $\text{C}_2\text{HBrClF}_3$.

Генерация когерентного излучения была получена на С-А переходе молекулы XeCl^* с длиной волны 352 нм. Несмотря на сильно неоптимальные параметры зеркал резонатора (малый коэффициент отражения на длине волны 352 нм, небольшой размер лазерной трубки) порог генерации был не высок и составлял около 15% максимального значения нейтронного потока в замедлителе. Генерация происходила на переднем фронте нейтронного импульса накачки и прекращалась до достижения максимальных значений плотности потока нейтронов.

Следует заметить, что слабая генерация имела место и на В-Х переходе молекулы XeCl^* с длиной волны 308 нм. Порог начала генерации был ниже, чем на переходе С-А, но она прекращалась значительно раньше из-за возникновения в активной среде лазера нестационарного поглощения излучения с длиной волны 308 нм, связанного, по-видимому, с накоплением метастабильных атомов Xe^* и возникновения поглощения за счет процесса



или за счет собственного поглощения эксимерными молекулами XeCl^* (В)*

Были измерены спектры излучения газовых смесей, записанные при наличии резонатора и при его отсутствии, когда вместо зеркал были установлены кварцевые окна. Эти спектры дополнительно свидетельствовали по сужению излучаемой полосы о существовании генерационного режима.

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

О СПЕКТРЕ ВЫНУЖДЕННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАКАЧКИ СО СРЕДОЙ

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

ON THE SPECTRUM OF STIMULATED TEMPERATURE LIGHT SCATTERING IN THE NON-STATIONARY INTERACTION OF THE PUMP WITH THE MEDIUM

The induced thermal scattering of light has been 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 χ – коэффициент температуропроводности 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 anomalously 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].

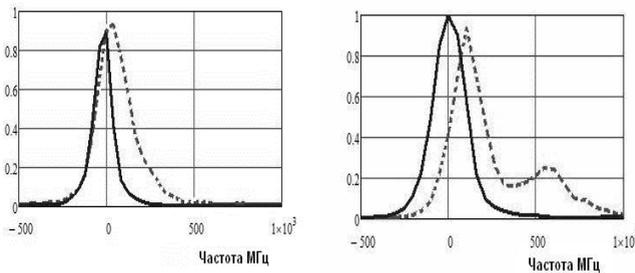


Рис.1.Спектры:накачка – сплошная кривая, отраженное излучение – пунктир.

Список литературы

1. HeG., YongK., ZhuJ., PrasadP.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.at al. *J. Chem. Phys.*, 138, 024202 (2013).
- 4.A.S.Averyushkin, N.A.Bulychev, V.F.Efimkov, 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.Jirauschek, DaN.Hogan, Y.Chen, “High - spectral - resolution stimulated Rayleigh – Brillouin scattering at 1 μm ”, *Opt.Lett*, 26, N23, p.1894, 2001.

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

О ТОЧНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАЛЫХ ЧАСТОТНЫХ СДВИГОВ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Предложена и реализована методика математической обработки оцифрованных интерферограмм Фабри-Перо с целью исключения субъективных факторов и увеличения точности измерений.

A.A.GORDEEV, V.F.EFIMKOV, I.G.ZUBAREV, S.I.MIKHAILOV

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

The method of mathematical processing of digitized Fabry-Perot interferograms is proposed and implemented in order to exclude subjective factors and increase the accuracy of measurements.

В многочисленных работах, посвященных экспериментальному исследованию вынужденных рассеяний с малым частотным сдвигом, для регистрации спектров с помощью эталона Фабри-Перо, используется метод разделения поля зрения регистрирующего спектр элемента (фотоплёнка, ПЗС матрица) на две независимые области. Причем каждая из областей освещается только одним источником света (обычно это излучение накачки и излучение вынужденного рассеяния, см., например, [1 – 4]). Для адекватного определения частотного сдвига необходимы точные измерения диаметров интерференционных колец. Эти измерения предполагают, что интерференционная картина разделена строго по диаметру. Но в экспериментальной практике такое деление, естественно, осуществляется с некоторой ошибкой, и это сразу вносит ошибку в измерения. Кроме этого, изображение колец носит спеклованный характер, что затрудняет нахождение максимума спектральной линии. Разработке метода минимизации перечисленных ошибок и посвящена данная работа. В таком устройстве фокусе объектива образуется спектральная картина, в одной половине которой располагается спектр (полукольца) излучения первого пучка, в другой – второго. Находящаяся в фокусе объектива 6 ПЗС-матрица (в нашем случае - WinCamD-UCM фирмы DataRay, 1020×1020 пикселей) регистрирует спектральную картину, которая обычно наблюдается на мониторе компьютера и обрабатывается с помощью стандартного программного обеспечения. Для увеличения точности измерения параметров интерференционной картины, очевидно, необходимо найти геометрический центр системы интерференционных колец и произвести суммирование значений амплитуд по радиусу в определенном угле отдельно для верхней и нижней полуплоскости. Эта процедура эквивалентна усреднению по ансамблю реализаций случайных

фазовых соотношений, т.е. переходу от когерентной засветки к некогерентной. Нами был предложен и реализован алгоритм поиска центра интерференционной картины, основанный на определении максимума интеграла перекрытия заранее выбранного кольца интерференционной с кольцом однородной засветки. Толщина кольца составляла величину порядка толщины исследуемой линии. Практическая реализация алгоритма была проведена с помощью математического пакета Mathcad 15. Результаты опубликованы в [5]. На рис.1 представлены интерферограммы и результат математической обработки. Толщина зазора эталона составляла 9см. Эксперименты проводились на второй гармонике неодимового лазера с пассивной модуляцией добротности.

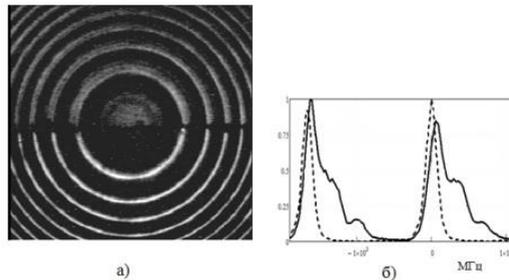


Рис.1.Спектры:накачка – сплошная кривая, отраженное излучение – пунктир.

Список литературы

1. КарповВ.Б., КоробкинВ.В., ДолголенкоД.А.,Квантовая электроника, **18**, № 11,1350 (1991).
2. AveryushkinA.S., BulychevN.A., EfimkovV.F., ErokhinA.I., KazaryanM.A.,MikhailovS.I., SaraevaI.N.,ZubarevI.G.,Laser Phys.,**27**, 055401 (2017).
3. Erokhin A.I.,SmetaninI.V., MikhailovS.I., BulychevN.A.,Optics Letters,**43**, No. 7/1,(2018).
4. БельдюгинИ.М., ГордеевА.А., ЕфимковВ.Ф., ЗубаревИ.Г., МихайловС.И., СоболевВ.Б.,Квантовая электроника, **39**, №12, 1148 (2009).
5. ГордеевА.А., ЕфимковВ.Ф., ЗубаревИ.Г., МихайловС.И.,Квантовая электроника, **48**, № 9,823(2018).

Н.М.МУСТАФОЕВА¹, А.К.ТАШАТОВ¹, Б.Е.УМИРЗАКОВ²

¹Каршинский Государственный университет, г. Карши, Узбекистан

²Ташкентский Государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ NiSi₂/Si С ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДОВ РЭМ И АСМ

Интерес к получению и изучению физико-химических свойств тонких пленок силицидов металлов прежде всего связаны с возможностью применения их для создания МДП, ПДП транзисторов, СВЧ-приборов, детекторов излучения, омических контактов и барьерных структур. В данной работа методами оже-электронной спектроскопии, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии изучено формирование эпитаксиальных слоев NiSi₂ при осаждении Ni в Si с последующим отжигом.

Нанесение пленок Ni на поверхность Si осуществлялась нагревом Ni электронной бомбардировкой. Перед напылением, проволоки из особо чистого Ni обезгаживались в течении 5–6 часов при вакууме не хуже, чем 10⁻⁵ Па. Скорость напыления пленок определялась предварительно с использованием метода ОЭС в сочетании с отжигами она составляла ~0,5 Å/мин.

Анализ АСМ-изображения поверхности Si (111) с пленкой NiSi₂ толщиной ~ 50 Å показали что пленка имеет островковый характер. Эти островки имеют форму конуса (или пирамиды) и их высота доходит до 7 – 8 нм. Анализ РЭМ-картин показал, что островки имеют форму многогранника с линейными размерами ~ 0,2 – 0,3 мкм. Расстояние между центрами этих фаз ~ 0,8 – 1 мкм. Наряду с крупными островками на поверхности формируются множество мелких островков (фаз). Дальнейшее увеличение толщины пленок (времени твердофазного осаждения) не приводило к заметному росту высоты основных островков. При этом наблюдалось увеличение поверхностных размеров крупных островков и увеличение трех размеров мелких островков. В случае пленки NiSi₂ с h = 150 Å практически 80 – 85 % поверхности Si покрываются островками NiSi₂ (рис).

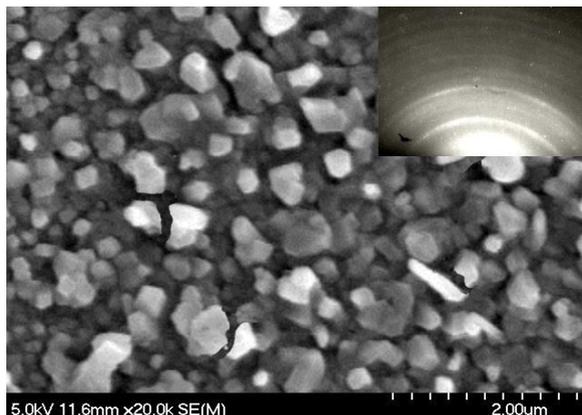


Рис. РЭМ - изображения поверхности Si (111) с пленкой NiSi₂ толщиной 150 Å.

Размеры островков составляют 0,3 – 0,5 мкм. При этом на ДБЭ картине обнаруживаются концентрические кольца характерные для поликристаллических образцов. По-видимому, хотя после прогрева при $T = 800$ К происходит кристаллизация пленки, однако кристаллографические направления отдельных кристаллов не совпадают друг с другом. Коалесценция островков и образование сплошной пленки происходило при толщине ~ 200 Å. Однако при этой толщине пленки являлись неравномерными и значение h лежала в пределах 100 – 150 Å. Наиболее совершенные однородные эпитаксиальные пленки NiSi₂ образовались при толщине $h \geq 200$ Å, после прогрева при $T = 950$ К.

Таким образом в процессе твердофазного осаждения Ni в Si в сочетании с отжигом на поверхности Si формируются эпитаксиальные нанопленки NiSi₂. При толщинах $h \leq 150$ Å пленки имеют островковый характер. Из-за близости параметров решетки NiSi₂ и Si на границе NiSi₂/Si не возникает заметного напряжения и следовательно формируется сравнительно узкий переходной слой (50 – 60 Å).

К.Н. ОВЧИННИКОВ, С.А. УРЮПИН
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПЛАЗМУ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Выявлена возможность генерации низкочастотного излучения при нормальном падении лазерного импульса на плотную плазму в постоянном магнитном поле. Генерация возникает из-за движения электронов под действием магнитного поля и ортогональной ему медленно изменяющейся во времени пондеромоторной силы, локализованной в скин-слое, в который проникает лазерное излучение. Характерные частоты излучения определяются обратной длительностью лазерного импульса. Найдена напряжённость поля генерируемого излучения и дан анализ её зависимости от ларморовской частоты электронов, параметров плазмы и лазерного импульса.

K.N. OVCHINNIKOV, S.A. URYUPIN

P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

GENERATION OF LOW-FREQUENCY RADIATION UNDER THE LASER PULSE EFFECT ON A PLASMA IN A MAGNETIC FIELD

We reveal the possibility of a low-frequency radiation generation at a normal incidence of the laser pulse on a dense plasma in a constant magnetic field. The generation occurs due to the motion of electrons under the magnetic field effect and a ponderomotive force slowly varying with time localized in the skin layer where the laser radiation penetrates. The characteristic radiation frequencies are determined by the inverse duration of the laser pulse. We find the field strength of the radiation generated and its dependences on the Larmor frequency of electrons and the plasma and laser pulse parameters.

Изучению механизмов генерации терагерцевого излучения при взаимодействии импульсов лазерного излучения с проводящими средами посвящено немало работ. Одним из наиболее часто обсуждаемых механизмов является генерация, возникающая при пондеромоторном воздействии фемтосекундного импульса сфокусированного лазерного излучения на проводящую среду. Другой механизм – генерация терагерцевого излучения током увлечения, возникающим при наклонном падении лазерного излучения на поверхность проводника. В проводящих средах с высокими частотами столкновений электронов преобладает генерация терагерцевого излучения нелинейным током, возникающим из-за неоднородного нагрева электронов. Нами описан ещё один механизм генерации терагерцевого излучения, возникающий в присутствии постоянного магнитного поля, направленного вдоль поверхности плазмы (подробнее см. [1]).

Рассмотрено взаимодействие фемтосекундного импульса лазерного излучения с занимающей полупространство плазмой, в условиях, когда плазменная частота электронов больше несущей частоты излучения. При этом лазерное излучение проникает на глубину скин-слоя и напряжённость поля экспоненциально спадает вглубь плазмы. Возникающая из-за неоднородности поля пондеромоторная сила направлена поперёк коллинеарного поверхности внешнего магнитного поля и изменяется за время порядка длительности лазерного импульса. Под действием постоянного магнитного поля и ортогональной ему пондеромоторной силы возникают нелинейные низкочастотные токи, в том числе вдоль поверхности плазмы, которые и являются источником низкочастотного излучения. Используя простейшие материальные уравнения для средней скорости электронов, найдены нелинейные низкочастотные токи. Получено решение уравнений поля, содержащих нелинейные источники терагерцевого излучения. Найдена напряжённость поля генерируемого излучения и дан анализ её зависимости от ларморовской частоты электронов, параметров плазмы и лазерного импульса.

Список литературы

1. Ovchinnikov K.N., Uryupin S.A. // Journal of Russian Laser Research 2019, Vol. 40, № 5, p. 467–473.

В.А. ХЛОПОНИН, Д.В. ПАНОВ, Д.В. УШАКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЛАЗЕРНОЕ ДЕСТРУКТИРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Исследовано уменьшение волнистости с помощью лазерного деструктурирования на структурах для сплавов ВТ6 и инконель 718. Показана эффективность данного процесса в сравнении с лазерным полированием без амплитудно модулированной мощности.

V.A. KHLOPONIN, D.V. PANOV, D.V. USHAKOV

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

LASER DESTRUCTURING OF METAL SURFACES

The decrease in waviness using laser destructuring on structures for Ti-6-4 and Inconel 718 alloys has been studied. Efficiency of this process has been shown in comparison with laser polishing without power modulation.

Лазерное деструктурирование – технологический процесс уменьшения структур на поверхности металлических деталей путем переплавления поверхностного слоя с помощью лазерного излучения, мощность которого амплитудно модулирована в соответствии со структурой поверхности [1,2].

Деструктурирование позволяет улучшить текстуру поверхности деталей, полученных с помощью аддитивных технологий (технологии прямой лазерной наплавки DMD, селективного лазерного плавления SLM), а также проводить лазерную обработку поверхности на тех участках деталей, где затруднительно применение традиционных финишных технологий. Материалами для исследования стали титановый сплав ВТ6 и жаропрочный сплав инконель 718, широко применяющиеся в аддитивных технологиях и в авиакосмической промышленности.

Эксперименты проводились на роботизированной установке ABB IRB 4600, оснащенной лазером LC2 производства фирмы «НТО «ИРЭ-Полнос». Перед обработкой рабочая камера заполнялась аргоном до содержания кислорода менее 0,1%. Структуры на поверхности металла для экспериментов созданы методом лазерного структурирования.

Для образцов из сплава ВТ6 удалось уменьшить исходную волнистость структур с пространственной длиной волны 2 мм на 89,7% (Ra исходной структуры составляет 15,8 мкм, после деструктурирования 1,62 мкм). Для сравнения: при обработке немодулированным лазерным излучением при тех же

параметрах обработки волнистость уменьшилась только на 4,3% (до $R_a = 15,2$ мкм) (см. рис. 2а).

Для образцов из сплава инконель 718 удалось уменьшить исходную волнистость структур с пространственной длиной волны 2 мм на 77,5 % (R_a исходной структуры составляет 6,76 мкм, после деструктурирования 1,51 мкм). Для сравнения: при обработке немодулированным лазерным излучением при тех же параметрах обработки волнистость уменьшилась только на 10,1 % (до $R_a = 6,08$ мкм) (см. рис. 1б).

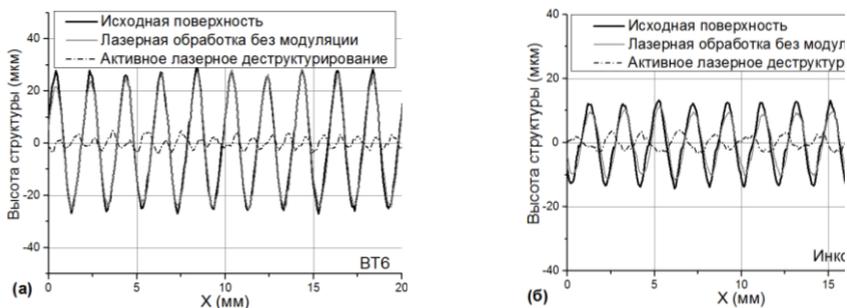


Рис. 1. Исходная структура, лазерная обработка без модуляции мощности и активное лазерное деструктурирование на поверхности детали из сплавов ВТ6 (а) и инконель 718 (б).

Впервые проведены работы по деструктурированию волнистости на титановых (ВТ6) и никель-хром-железных сплавах (инконель 718), определены параметры лазерной обработки, позволяющие уменьшить волнистость исходных структур методом лазерного деструктурирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества в рамках научного проекта №19-58-12006

Список литературы

1. Oreshkin O., Küpper M., Temmler A., Willenborg E. Active Reduction of Waviness through Processing with Modulated Laser Power // Journal of Laser Applications. – 2015. – Vol. 27, №2. – <http://doi.org/10.2351/1.4906622>.
2. Temmler A., Küpper M., Walochnik M. A., Lanfermann A., Schmickler T., Bach A., Greifenberg T., Oreshkin O., Willenborg E., Wissenbach K., Poprawe R.. Surface structuring by laser remelting of metals // Journal of Laser Applications. – 2017. – Vol. 29, №2. – <http://doi.org/10.2351/1.4972414>.

В.П. БИРЮКОВ¹, Д.В. ПАНОВ², В.Н. ПЕТРОВСКИЙ²,
Д.В. УШАКОВ²

¹Федеральное государственное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный институт «МИФИ», Москва

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ

В работе представлены результаты металлографических и трибологических исследований зон лазерного упрочнения стальных образцов. Проведен полный факторный эксперимент по лазерной закалке с изменением расстояния от фокальной плоскости, мощности излучения и скорости обработки. По уравнениям регрессии получены закономерности изменения глубины и ширины зон закалки. При низкочастотном поперечном сканировании лазерного луча до 90 Гц получены зоны упрочнения шириной 19,8 мм и глубиной 1,42-1,96 мм за один проход. Износостойкость закаленных зон в 3,72 раза выше материала основы.

V. P. BIRYUKOV¹, D. V. PANOV², V. N. PETROVSKY²,
D. V. USHAKOV²

¹Federal budget-funded research Mechanical Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Science, Moscow

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

CALCULATION AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF LASER HARDENING ZONES AND WEAR RESISTANCE OF STEEL

The paper presents the results of metallographic and tribological studies of laser hardening zones of steel samples. A full factorial experiment on laser quenching with changes in the distance from the focal plane, radiation power and processing speed was performed. The regularities of changes in the depth and width of the quenching zones are obtained from the regression equations. At low-frequency cross-scanning of the laser beam up to 90 Hz, hardening zones with a width of 19.8 mm and a depth of 1.42-1.96 mm were obtained in one pass. The wear resistance of hardened zones is 3.72 times higher than the base material.

При проведении оптимизации режимов лазерного упрочнения стали AISI 4130 установлено, что скорость сканирования $V = 4,5$ мм/с, мощность лазера $P = 1500$ Вт, положение фокальной плоскости $F = 62$ мм, при этих параметрах плотность мощности составляет 83 Вт/мм². При оптимальности режимах обработки твердость повышается до 7970 МПа, и в 3 раза превышает твердость основного металла 2660 МПа при глубине $1,3$ мм и ширине $9,9$ мм упрочненной зоны. Установлено, что лазерная закалка с перекрытием дорожек 50% имеет более однородную твердость поверхности образца, чем при перекрытии дорожек 30% . Лазерное упрочнение поверхности углеродистой стали AISI 4130

приводит к изменению исходных фаз основного металла на мартенситную фазу[1].

Лазерная термообработка поверхности стали Сk45 создает микроструктуру с 91,65% игольчатого мартенсита и 8,35% остаточного аустенита [2]. Твердость мартенсита достигает до 850 HV, а остаточного аустенита 400–600 HV. Износостойкость образцов закаленных лазером в два раза выше, чем исходной стали.

Целью настоящей работы является определение влияние дефокусировки луча волоконного лазера на глубину и ширину зон лазерного упрочнения, режимов обработки на параметры закаленных зон при низкочастотных поперечных колебаниях луча. На рис. 1 представлены зависимости глубины и ширины зон закалки при различных режимах обработки.

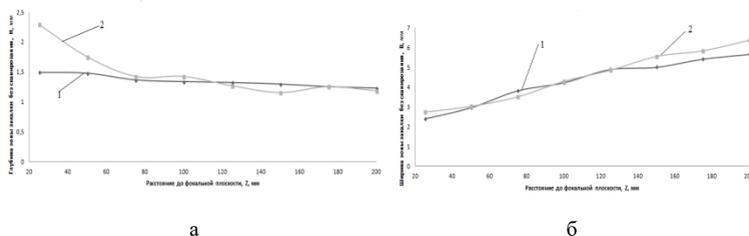


Рис. 1. Зависимость глубины (а) и ширины (б) зон закалки от дефокусировки лазерного луча: 1 – $V = 10$ мм/с, $P = 1000$ Вт, 2 - $V = 18$ мм/с, $P = 1800$ Вт.

Глубина и ширина зоны закалки изменяется практически линейно в интервале дефокусировки луча 100-150 мм. Применение линейных уравнений регрессии показало незначительное расхождение расчетных и экспериментальных значений не более 3,2%. Микротвердость изменялась от 7430 до 7980 МПа. Применение поперечных колебаний луча с частотой до 90Гц позволило получить закаленные слои с шириной 19,6 мм и глубиной 1,42-1,96 мм за один проход. Износостойкость зон лазерной закалки в 3,72 раза выше материала основы.

Список литературы

1. Moradi M., Karami Moghadam M. High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization // Optics and Laser Technology 111 (2019) 554–5702.
2. Adel K. M. Enhancement of Dry Sliding Wear Characteristics of CK45 Steel Alloy by Laser Surface Hardening Processing // Procedia Materials Science. 2014. V.6. p. 1639 – 1643. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.148

Р.П. ПЛЕШАКОВА¹, А.В. ИЛЬИНСКИЙ¹, А.А. ИСАЕВ²,
К.И. КОЗЛОВСКИЙ², Е.А. ШИКАНОВ³

¹Институт геофизических и радиационных технологий МАН ВШ

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

³ООО «Спецавтоинжиниринг»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАПЯЯННЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК НА БАЗЕ ДИОДОВ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Рассмотрены технологические схемы, и возможности их реализации для изготовления двух типов запаянных вакуумных ускорительных трубок для генерации нейтронов на базе диодов с магнитной изоляцией электронного компонента. В первом конструктивном варианте трубки используется специальный постоянный магнит в виде втулки с продольной намагниченностью, расположенный в вакуумном объеме. Во втором варианте вместо магнита используется спиральная линия.

R.P. PLESHAKOVA, A.V. ILYINSKIY, K.I. KOZLOWSKIY,
A.A. ISAEV, E.A. SHIKANOV,

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

TECHNOLOGY POSSIBILITIES OF REALISATION SEALD-OF THE ACCELERATION TUBES ON THE BASE OF DIODE WITH MAGNETIC ISOLATION

Two schemes describing technology of producing sealed-off accelerating tubes on the basis diode with magnetic insulating and possibilities of their realization are proposing in this work. Two constructions of developing tubes with laser source of deuterons also are proposed. The first one is the tube including the system for suppress electron conductivity due to permanent magnet which can be placed inside vacuum volume of tube. Another one consist the system for suppress secondary electron emission in pulsed axial magnetic field created by special spiral line placed inside tube. Запаянных ускорительных трубок

В докладе рассматриваются технологические схемы изготовления запаянных ускорительных трубок (УТ) на базе малогабаритных вакуумных диодов с магнитной изоляцией (ДМИ). Во всех вариантах такого типа УТ предполагается использовать лазерные источники ионов (ИИ). Технология изготовления лазерных нейтронных трубок (ЛНТ) и ее особенности подробно изложены в работе [1]. Указанные трудности в реальном производстве ЛНТ: наличие нейтронно-образующей мишени (М) сложной конфигурации, окна для ввода лазерного излучения в трубку, были решены.

В нашем случае большой проблемой в изготовлении УТ является наличие постоянного магнита, размещенного внутри вакуумного объема УТ. Перед монтажом постоянного магнита в УТ он, как и все детали и узлы, должен

проходить операцию термообработки на вакуумном посту, однако, при этом он может размагнититься при прохождении точки Кюри. Этот вопрос может быть рассмотрен отдельно с использованием результатов экспериментального исследования УТ с ИИ, внутри которого закреплен постоянный магнит [3], что вселяет уверенность в возможности реально создать предполагаемый вариант УТ с ДМИ. Например можно рассмотреть возможность помещения собранной УТ в намагничивающее устройство уже после термообработки. Что касается требованиям к параметрам магнита, то в работе [2] были проведены расчеты оптимального значения индукции магнитного поля (B) в зависимости от геометрии электродов. Величина B , необходимая для подавления электронной проводимости, лежит в пределах 100-600 мТл, что требует увеличения массы и соответственно размеров, но их внешний диаметр ограничен диаметром УТ.

При разработке другой технологической схемы изготовления УТ с ДМИ со спиральной линией, создающей магнитное поле для подавления электронной проводимости, при разряде на нее электрической емкости возникли сложности связанные с созданием герметичных электрических вводов для соединения спирали с емкостью.. Исходя технологического опыта изготовления УТ других типов можно предложить следующую технологическую схему. После всех технологических операций, традиционно необходимых при изготовлении УТ вплоть до процесса сборки изоляционного корпуса УТ с мощными выводами, на которые монтируется спираль-заготовка из материала типа ХК, выполняются все операции, как в обычных технологических схемах разработанных для изготовления УТ до процесса прогрева при температуре 400 градусов в течение 4 ч под откачкой. Потом следуют операции высоковольтной тренировки, отпайка от откачного поста и цоколёвка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 05.605.21.0182 П(RFMEFI60519X0182).

Список литературы

1. Плешакова Р.П. и др. Технологические особенности изготовления ускорительных нейтронных трубок с лазерным (ЛНТ-2М) и вакуумно-дуговым (ДИН-1) ионными источниками для геофизических исследований. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Радиационная техника, в.1, 1990, стр.30.
2. Плешакова Р.П., Шиканов А.Е. и др. Пат. N1632249, 1993. Импульсная нейтронная трубка.
3. Плешакова Р.П. и др. Исследование возможности улучшения стабильности работы частотных нейтронных трубок, Вакуумная техника и технология, т.13, N 1, 2003

О.В. РОЗОВА, В.А. СТЕПАНОВ

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

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫХ ПРОЦЕССОВ В БИОТКАНЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

С помощью физического моделирования воздействия низкоинтенсивного излучения на биоткани и изучения процессов деформации биомембран в неоднородном температурном поле показано, что помимо длины волны, интенсивности и частоты посылки импульсов важной для эффективности терапии характеристикой излучения является длительность импульса.

O.V. ROZOVA, V.A. STEPANOV

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering "National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Obninsk, Russia

THE PHYSICAL MODELLING MICRO CIRCULATORY PROCESSES OF BIOLOGICAL TISSUES UNDER THE LOW-INTENSITY IR-RADIATION

A physical modelling of the low-intensity IR-radiation influence on biological tissue was carried out. The deformation processes of biomembrane under the action of a non-uniform temperature field are studied. In addition to wavelength, pulse intensity and frequency the importance of pulse length has been shown for the effectiveness of laser therapy.

Низкоинтенсивная лазерная терапия является эффективным физиотерапевтическим методом лечения. Результат воздействия излучения связан с мягким изменением температурного поля и активацией обменных процессов в биологических тканях, приводящих к стимулированию защитных функций организма. При распространении низкоинтенсивного лазерного излучения вследствие оптической неоднородности биотканей возникает неоднородное температурное поле, в котором происходят значительные деформации клеточных мембран и изменение их электрохимического потенциала [1,2].

Осмотическое давление $\Delta p = nRT\left(\frac{\Delta T}{T}\right)$ зависит от температурного градиента и устанавливается на временах $\tau_b \sim 10^{-4}$ с (характерное время диффузии молекул воды через мембрану) [2]. Поэтому эффективность стимулирования циркуляции жидких компонент биотканей вследствие деформации мембран выше в случае импульсного лазерного воздействия. На эффективность воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения не оказывают влияние такие свойства, как поляризация и когерентность, в то время как существенными параметрами

стимулирования микроциркуляторных процессов являются интенсивность, длительность и частота импульсов.

В настоящее время экспериментально установлено, что лазерное излучение в диапазоне длин волн (0,4-1,6 мкм) с плотностью потока 10^{-3} - 10^0 Вт/см² оказывает стимулирующее действие на процессы в биотканях. При этом наиболее эффективным является диапазон 0,8-1,5 мкм, соответствующий глубокому проникновению излучения.

В данной работе исследовали влияние индуцируемой излучением неоднородности температурного поля $\Delta T = bI(t) - \frac{\Delta T}{\tau_T}$ (где b - измеряемый коэффициент, $I(t)$ - плотность потока лазерного излучения, τ_T - время температурной релаксации) на степень деформации биологической мембраны посредством варьирования частоты и длительности импульсов.

Традиционно в качестве источников излучения в лазерной терапии используют лазерные диоды. Однако в работе показано, что монохроматичность и когерентность излучения не влияют на биологическую эффективность действия импульсного излучения. В соответствии с этим предлагается использовать вместо лазерных диодов светодиоды с длительностью импульса, соответствующего времени установления осмотического давления.

Список литературы

1. Воронина О.Ю., Каплан М.А., Степанов В.А. Нерезонансный механизм биостимулирующего действия низкоинтенсивного лазерного излучения. / Препринт ФЭИ 2094. - 1990, 26 с.
2. Воронина О.Ю., Каплан М.А., Степанов В.А. Воздействие низкоинтенсивного лазерного излучения на биоткани. // Письма в ЖТФ.- 1990.- т.16.- в.6.- 46-49 с.

Н.Н. САМОТАЕВ¹, К.Ю. ОБЛОВ¹, А.В. КАЗИЕВ¹,
М.М. ХАРЬКОВ¹, А.В. ТУМАРКИН¹, А.А. НЕДУРУБОВ²,
А.И. ШАЙХАЛИЕВ², Т.В. БРАЙЛОВСКАЯ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России, Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО И ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Приведены результаты профилометрических исследований поверхности дентальных имплантатов, модифицированных с использованием технологий плазменного и лазерного воздействия. Продемонстрирована возможность создания шероховатости на поверхности титана, характерной для методов обработки, применяемых ведущими компаниями-производителями имплантатов с целью ускорения остеоинтеграции при контакте поверхности имплантата и костной ткани.

N.N. SAMOTAEV¹, K. Yu. OBLOV¹, A.V. KAZIEV¹,
M.M. KHARKOV¹, A.V. TUMARKIN¹, A.A. NEDORUBOV²,
A.I. SHAIKHALIYEV², T.V. BRAILOVSKAYA²

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

²I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

STUDY OF LASER AND PLASMA SURFACE TREATMENT OF TITANIUM DENTAL IMPLANTS

The results of profilometric studies of the dental implants' surfaces modified using plasma and laser technologies are presented. We report the possibility of preparing titanium surfaces with roughness typical for conventional methods used by leading implant production companies in order to accelerate osseointegration when the implant surface is in contact with bone tissue.

В исследованиях последних лет [1] показано, что в процессах вторичной фиксации зубных имплантатов микроструктура поверхности играет важнейшую роль. Тем не менее, отсутствуют комплексные исследования данной тематики. Кроме того, в современной имплантологии, в силу сложившихся отраслевых традиций, для развития микрорельефа принято использовать технологию Sand-blasting with Large grit and Acid-etching (SLA). При использовании SLA технологии неизбежным является загрязнение поверхности титанового имплантата частицами песка, внедряющимися в приповерхностный слой изделий и ухудшающими его приживаемость. К тому же, технология SLA не позволяет создавать рельеф поверхности, наиболее благоприятный для прироста костной ткани, т.к. для этого требуется метод, гарантирующий получение поверхности с наперед заданными и хорошо контролируемыми

характеристиками. Такими методами, альтернативными SLA, являются современные плазменные и лазерные технологии.

Проведенные исследования микрорельефа на поверхности титана Gr4 и сплава Ti-6Al-7Nb методами оптической профилометрии и сканирующей электронной микроскопии показали, что комбинация технологий лазерной и плазменной модификации поверхности позволяет создавать программно-контролируемый тип рельефа с широким диапазоном шероховатости (см. рис. 1), различной топологией и возможностью комбинировать структуры разных размеров и типов. Размеры поверхностных структур могут быть оптимизированы для повышения качества дентальных имплантатов. Диапазоны этих размеров покрывают возможности технологий, применяемых сегодня ведущими компаниями-производителями имплантатов.

Параметр	Тип поверхности титанового импланта				
	Евротех	Конмет тип 1	Конмет тип 2	Плазма (разброс)	Лазер (разброс)
Sz, мкм	19,8	36,7	35,6	4,3...6,88	4,7...68,6
Sp, мкм	8,4	6,2	17,9	2,3...2,76	1,6...30,3
Sv, мкм	11,4	30,5	17,7	2,0...4,12	3,1...38,3
Sa, мкм	1,424	1,349	2,172	0,435...0,557	0,258...9,753
Sq, мкм	1,884	1,848	2,961	0,558...0,717	0,35...11,7
Ssk	0,0031	-2,016	-0,31	0,274...-0,454	-0,82...-0,53
Sku	4,98	1,349	5,9	3,366...3,892	2,645...6,63

Рис. 1. Таблица с параметрами шероховатости дентальных титановых имплантатов, обработанных SLA методом, в сравнении с методами плазменной и лазерной обработки.

Центральным аспектом работы с точки зрения фундаментальных основ технологии обработки поверхностей для нужд медицины является возможность получения надежных данных о связи характеристик остеоинтеграции с формой и размерами рельефа поверхности имплантата полученных в ходе систематических исследований при контролируемой модификации поверхности без изменения ее химического состава.

Список литературы

1. I.A. Khlusov, Y. Dekhtyar, Y.P. Sharkeev, V.F. Pichugin, M.Y. Khlusova, N. Polyaka, F. Tyulkin, V. Vendinya, E. V. Legostaeva, L.S. Litvinova, V. V. Shupletsova, O.G. Khaziakhmatova, K.A. Yurova, K.A. Prosolov, Nanoscale electrical potential and roughness of a calcium phosphate surface promotes the osteogenic phenotype of stromal cells, *Materials (Basel)*. 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11060978>.

Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, А.В. ГОРШКОВА,
А.В. ИВАНОВА, Д.В. ФИЛИПЧУК

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ МИКРОФРЕЗИРОВКИ

Описывается использование технологии адаптивной лазерной микро фрезеровки для изготовления керамических корпусов электронных компонент в миниатюрном форм-факторе для поверхностного монтажа (SMD). Текущие результаты показывают, что с использованием описанной технологии возможно успешное изготовление SMD корпусов начиная от форм-фактора типа SOT-23 в направлении более крупных габаритных размеров.

N.N. SAMOTAEV, K.Yu. OBLOV, A.V. GORSHKOVA,
A.V. IVANOVA, D.V. PHILIPCHUK

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

CERAMIC PACKAGES PROTOTYPING FOR ELECTRONIC COMPONENTS BY USING LASER MICRO MILLING TECHNOLOGY

The use of adaptive laser micro-milling technology for the manufacture of ceramic housings of electronic components in a miniature surface mount form factor (SMD) is described. Current results show that using the described technology it is possible to successfully manufacture SMD cases starting from the SOT-23 form factor in the direction of larger overall dimensions.

После экспериментов с широким перечнем керамических материалов применяемых в современной микроэлектронике [1] (ZrO_2 , Al_2O_3 , LTCC и т.д.) была разработана комбинация технологии адаптивной лазерной микрогравировки и струйной печати для изготовления миниатюрных заказных микроэлектронных корпусов для поверхностного монтажа. В качестве объекта эксперимента были выбраны корпуса для газовых сенсоров. Так как данный подкласс корпусов отвечает наиболее жестким требованиям к своей эксплуатации из существующего перечня радиоэлектронных компонент – в связи с работой в условиях повышенной загазованности атмосферы токсичными и взрывоопасными газами.

В качестве устройства лазерной микрофрезеровки в работе применялся 4-х координатный программно-аппаратный комплекс на базе установки МиниМаркер-2 производства ООО «Лазерный Центр» (Санкт-Петербург) с длиной волны 1,064 мкм, неконтактный профилометр и программное

обеспечение собственной разработки реализующее адаптивную микрогравировку, на базе обратной связи от on-line измерений результатов микрогравировки неконтактным профилометром. Для нанесения металлизации применялся струйный (PICO Pulse) и пневматический (xQR41 Series MicroDot) клапаны компании Nordson смонтированные на том же 4-х координатном программно-аппаратном комплексе (рис.1), позволяющие получать разрешение печати до 50 мкм.

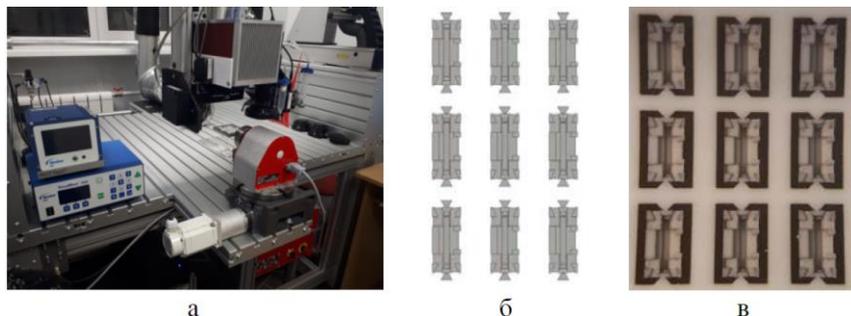


Рис. 1. (а) Внешний вид 4-х координатного программно-аппаратный комплекса на базе установки МиниМаркер-2 (б) 3D-модель SMD корпуса в формате STL взятое из в программы Autodesk Inventor (в) результат двухсторонней лазерной микрогравировки в керамике Al_2O_3 массива крышек корпуса газового сенсора типа SOT-23 по представленной 3D-модели.

Опыт нашей работы показал, что если данная технология используется квалифицированными специалистами - это дает фантастический скорость проектирования и изготовления, готовых к эксплуатации SMD керамических корпусов для радиоэлектронных компонент, в миниатюрном исполнении, начиная с форм-фактора SOT-23.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 14.587.21.0053 от 21.02.2018, уникальный идентификатор RFMEFI58718X0053) в рамках совместного российско-венгерского проекта.

Список литературы

1. Vasiliev, A.A., Pislakov, A.V., Sokolov, and others// Sensors and Actuators, B 2016. Vol. 224, P. 700-713.

Т.А. СЕМЕНОВ^{1,2}, Н.А. КУЗЕЧКИН¹, М.С. ДЖИДЖОЕВ¹, А.В.
БАЛАКИН¹, К.А. ИВАНОВ^{1,3}, И.А. ЖВАНИЯ¹,
В.М. ГОРДИЕНКО¹

¹ Физический факультет и МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова

² ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ КЛАСТЕРНОЙ СТРУЕ

Исследована генерация рентгеновских квантов и эволюция размеров филаментов в зависимости от положения области локализации сфокусированного высокоинтенсивного ($\sim 4 \times 10^{16}$ Вт/см²) фемтосекундного Ti:Sa лазерного излучения вдоль расширяющейся струи кластеров аргона. Диагностика эволюции состояния расширяющейся кластерной струи осуществлена методом регистрации Рэлеевского рассеяния пробного излучения.

T.A. SEMENOV^{1,2}, N.A. KUZECHKIN¹, M.S. DZHIDZHIOEV¹, A.V.
BALAKIN¹, K.A. IVANOV^{1,3}, I.A. ZHVANIYA¹, V.M. GORDIENKO¹

¹ Faculty of Physics and ILC M.V. Lomonosov Moscow State University

² Federal Research Centre 'Crystallography and Photonics', RAS, Moscow

³ P.N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow

FEMTOSECOND LASER GENERATION OF X-RAY RADIATION IN A FREE EXPANDING CLUSTER JET

The generation of x-ray quanta and the evolution of filament sizes were studied depending on the position of the localization region of a focused high-intensity ($\sim 4 \times 10^{16}$ W/cm²) femtosecond Ti:Sa laser radiation along an expanding jet of argon clusters. The evolution of the state of an expanding cluster jet was diagnosed using the method of detecting Rayleigh scattering of probe radiation.

Облучение кластерной струи, получаемой при адиабатическом расширении атомного или молекулярного газа в вакуум, высокоинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами приводит к созданию наноплазмы, являющейся источником ультракоротких импульсов тормозного и характеристического рентгеновского излучения. Вместе с тем, газо-кластерная струя проявляет нелинейно-оптические свойства, которые используются в задачах лазерного ускорения электронов, генерации высоких гармоник и терагерцового излучения. Характеристики кластерной среды, определяющие ее свойства в качестве лазерной мишени, такие как плотность кластеров и их средний размер, сложным образом меняются с расширением кластерной струи. Таким образом, в зависимости от задачи необходимо выбирать оптимальные условия для лазерного воздействия. В настоящей работе выполнены

исследования генерации рентгеновских фотонов мульти-кэВ-ного уровня при продольном перемещении по расширяющейся кластерной струе области фемтосекундного лазерного воздействия. На первом этапе проведена характеристика расширяющейся кластерной струи методом регистрации Рэлеевского рассеяния пробного излучения (445 нм). Сигнал Рэлеевского рассеяния пропорционален концентрации и среднему размеру рассеивающих частиц ($I_R \sim n \cdot R^6$), и, поэтому, отражает картину кластеризации рассеивающей области. Перенос изображения области рассеяния на ПЗС-матрицу позволил установить распределение кластеризации в поперечном сечении. На следующем этапе выполнены измерения выхода рентгеновских квантов и размеров индуцированных в кластерном пучке плазменных филаментов при перемещении положения фокальной области сфокусированного высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения вдоль расширяющейся кластерной струи. В результате установлено, что величина интегрального сигнала Рэлеевского рассеяния от кластеров аргона при увеличении расстояния от среза конического сопла (Z) от 1.5 до 13.5 мм падает не более чем в ~ 2 раза, что позволяет говорить о наличии активной фазы процесса кластеризации и существенно далее среза сопла. Проведены исследования взаимодействия отрицательно chirпированных фемтосекундных лазерных импульсов (~ 140 фс, 20 мДж) с кластерной струей. В эксперименте рентгеновское излучение регистрировалось с помощью полупроводникового матричного детектора MediPix с энергетическим диапазоном 5 – 100 кэВ. В результате установлено, что интегральный выход рентгеновского излучения из лазерно-кластерной наноплазмы при увеличении Z с 1.5 мм до 13.5 мм не менялся в пределах ошибки измерений. Зарегистрированный рентгеновский спектр простирался с 5 до 35 кэВ, эффективность преобразования энергии лазерных импульсов в рентгеновское излучение составила $\sim 4 \times 10^{-8}$ при общем количестве рентгеновских квантов, излученных в полный телесный угол $N = 6 \times 10^5$. При этом наблюдается увеличение длины лазерного филамента от 780 ± 155 мкм до 2310 ± 230 мкм с образованием непрерывного плазменного канала диаметром ~ 40 мкм. Выход рентгеновского излучения сохранялся, по-видимому, за счет увеличения в ~ 3 раза длины лазерно-индуцированного взаимодействия.

Таким образом, в результате проведенных исследований показана возможность управления длиной взаимодействия интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с кластерной наноплазмой, проявляющейся в виде плазменного филамента. В зависимости от положения сфокусированного высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения в расширяющейся кластерной струе возможно управление областью локализации источника рентгеновского излучения: от минимального под срезом сопла до плавно меняющегося по продольному размеру на больших расстояниях. Полученный результат важен также и для задач, использующих нелинейно оптические свойства кластерной среды, таких как генерация высоких

гармоник, создание эффективного генератора терагерцового излучения, реализации схемы лазерного ускорения электронов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части разработки методов формирования газо-кластерных струй, гранта РФФИ № 18-52-41007 в части исследований генерации рентгеновского излучения при взаимодействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с кластерами.

В.А. ГОРШКОВ; А.С. САВЕЛЬЕВ; А.С. НЕВРОВ; А.В. СМИРНОВА

ООО «Электростекло», Москва

ФОКУСИРУЮЩИЕ АСФЕРИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ МЕГАДЖОУЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Идея создания лазерной термоядерной установки рассматривалась еще в 1960-х годах Басовым Н.Г. и Крохиным О.Н. На данный момент вводится в строй установка для проведения исследований вблизи порога зажигания DT-горючего, сборка камеры взаимодействия лазерной установки уже завершена. Для фокусировки лазерного излучения на мишень применяют внеосевые асферические линзы в составе финального оптического модуля (ФОМ). Указанные линзы изготавливаются в АО «НПО «Оптика» по разработанной технологии формообразования внеосевых асферических поверхностей оптических деталей (ТЕСАФ). Совместное использование технологии формообразования и стенда контроля угловых отклонений поверхностей линз ФОМ позволило добиться высокого качества внеосевых асферических оптических элементов как по параметрам среднеквадратичного отклонения формы поверхности, так и по значению величины кружка рассеяния.

V.A. GORSHKOV; A.S. SAVELIEV; A.S. NEVROV;
A.V. SMIRNOVA

Scientific and Production Association "Optica" Joint Stock Company, Moscow

FOCUSING ASPHERICAL OPTICAL COMPONENTS FOR A NEW-GENERATION MEGAJoule LASER SYSTEM

The idea of creating a laser thermonuclear installation was considered in the 1960s by Basov N.G. and Krokhin O.N. At the moment, an installation is being put into operation for conducting research near the DT-fuel, and the assembly of the interaction chamber of the laser installation has already been completed. To focus the laser radiation on the target, off-axis aspherical lenses are used as part of the final optical module (FOM). These lenses are manufactured in JSC NPO Optika using the developed technology of forming off-axis aspherical surfaces of optical parts. The combined use of shaping technology and the FOM lens surface angular deviation control stand allowed to achieve high quality of off-axis aspherical optical elements both in terms of the mean square deviation of the surface shape and in the value of the scattering circle.

Специалисты АО «НПО «Оптика» принимают активное участие в масштабном эксперименте создания современной российской лазерной установки с мегоджоульным уровнем энергии. Камера взаимодействия установки, расположенная в городе Саров, имеет 192 канала. Для фокусировки на мишени импульсного лазерного излучения в каналах камеры взаимодействия установки применяют внеосевые асферические линзы финального оптического модуля (ФОМ). Технология изготовления линз ФОМ, разработанная и

внедренная в производство, позволяет достичь точностных параметров по критерию среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{ско}} = \lambda/80$ ($\lambda=0,6328$ мкм). По результатам контроля заготовок линз ФОМ, в сформированном стенде контроля угловых отклонений поверхностей линз, определяется припуск на дальнейшую обработку:

- фрезерование сферических поверхностей ($R_{\text{сф}}=22364$ мм) с обеспечением разнотолщинности;
- шлифование сферических поверхностей линз;
- автоматизированное формообразование асферических поверхностей ($R=3646,2519$ мм);
- огабаривание (фрезерование) линз по контуру.

Разработанные стенд контроля угловых отклонений поверхностей линз ФОМ и автоматизированная технология формообразования внеосевых асферических поверхностей, позволили добиться высокого качества оптических элементов как по параметрам PV и RMS ($\text{RMS} = 0,03\lambda$, $\text{PV} = 0,2\lambda$), так и по значениям диаметра кружка рассеяния $d_{0,633}$ в плоскости минимального пятна ($d_{0,633} = 22 \div 47$ мкм) и его отклонению.

В.П. БИРЮКОВ¹, Д.А. СТАРОСТИН², Д.В. КЛЕВЕТОВ²,
¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
машиноведения им. А.А. Благодного РАН, Москва
²Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал», Ковров

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА МЕДНОЙ ОСНОВЕ НА СТАЛЬ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

В работе рассмотрен процесс наплавки порошка на основе меди ПР – БрАЖ 9,5 – 1, ПР –Л63, ПР – БрОС10–1,5 на образцы стали 40Х с применением излучения непрерывного СО₂-лазера и поперечного сканирования луча с частотой 227 Гц. Показано, что нагрузка заедания зависит от порошкового материала и режимов обработки. Исследовано влияние поперечных колебаний луча на качество и производительность процесса наплавки.

V. P. BIRYUKOV¹, D. A. STAROSTIN², D.V. KLEVETOV²,

¹Federal budget-funded research Mechanical Engineering Research Institute named after
A.A. Blagoderov of the Russian Academy of Science, Moscow
²All-Russian research Institute "Signal", Kovrov

DETERMINATION OF THE WEAR RESISTANCE OF COPPER- BASED COATINGS ON STEEL OBTAINED BY LASER SURFACING

The paper considers the process of surfacing a copper-based powder PR-BrAZh 9.5-1, PR-L63, PR-BrOSi10-1.5 on 40Cr steel samples using continuous CO₂ laser radiation and cross-scanning of the beam with a frequency of 227 Hz. It is shown that the load of jamming depends on the powder material and processing modes. The influence of transverse beam vibrations on the quality and performance of the surfacing process is studied.

Лазерная наплавка порошка алюминиевой бронзы CuAl10, с размером частиц 20-120 мкм, проводилась с использованием диодного лазера TruDiod 4006, фирмы TRUMPF на подложку нержавеющей стали 17-4PH диаметром 100 мм длиной 150 мм. Коэффициент перекрытия наплавленных дорожек составлял 50%. Обработку производили при мощности лазерного излучения 1500 Вт, диаметре луча 3,5 мм, скорости перемещения 300 мм/мин, расходе порошка 16 г/мин, в среде аргона. Введение хрома, в состав наплавляемой шихты, приводит к уменьшению содержания железа в покрытии и повышению его коррозионной стойкости [1].

В экспериментальных исследованиях использовали лазерный комплекс ИМАШ РАН. Образцы изготавливали из стали 40Х размерами 15×20×70 мм. Для наплавки выбраны порошки на основе меди ПР – БрАЖ 9,5 – 1, ПР –Л63, ПР – БрОС10–1,5 с размером частиц 40-150 мкм. В качестве варьируемых

параметров приняты мощность излучения $P=700-1000$ Вт, скорость обработки $V=5-10$ мм/с и диаметр пучка $d=1-2$ мм. Для определения нагрузки задания наплавленных образцов применялась машина трения универсальная МТУ-01. Испытания проводили по схеме «плоскость (наплавленный образец) - кольцо сталь 50ХФА (51-55HRC). Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,1–4,0 м/с и 1–3 МПа соответственно. В качестве смазочного материала использовали масло гидравлическое МГЕ-10А. Лазерная наплавка образцов выполнялась расфокусированным лучом и с поперечными колебаниями луча по нормали к вектору скорости лазерной обработки, с шагом между дорожками 3 мм. На рис.1 представлены зависимости нагрузки заедания от скорости скольжения для прутковых материалов латуни Л63 (129-138 HV) и бронзы БрАЖ9-4 (115-126 HV) и покрытий наплавленных лазерным лучом (ПНЛЛ) БрАЖ 9,5-1, Л63 (174-196 и 192-218 HV режим наплавки 1 и 2) , БрОС 10-1,5 (169-178 HV).

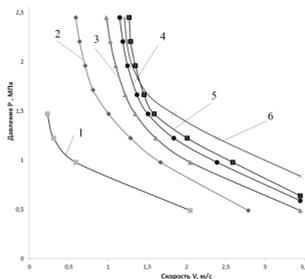


Рис. 1. Зависимость нагрузки заедания от скорости скольжения:

1 – прутковая латунь Л63; 2– прутковая бронза БрАЖ9-4; 3 – ПНЛЛ БрАЖ 9,5-1; 4 – ПНЛЛ Л63 (2); 5 – ПНЛЛ Л63(1); 6 – ПНЛЛ БрОС 10-1,5.

Анализ кривых (рис.1) показывает, что при скорости скольжения 2 м/с нагрузка заедания для прутковых латуни и бронзы составляет 0,5 и 0,8 МПа соответственно, а для наплавленных покрытий 1,0 – 1,5 МПа в зависимости от состава порошкового материала и режима обработки для Л63.

Список литературы

1. Yang J. et al. Effect of Cr additions on the microstructure and corrosion resistance of Diode laser clad CuAl10 coating // Surface and Coatings Technology 381 (2020) 125215.

DOI: /doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125215.

2. 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.

М. А. ТАРАСОВА, Д. А. КОЧУЕВ, К.С. ХОРЬКОВ, В.Г. ПРОКОШЕВ, А. В. ИВАЩЕНКО

*Владимирский государственный университет им. А.Г. И Н.Г. Столетовых,
Владимир, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

В работе проводится исследование характеристик лазерно-индуцированных плазменных каналов. Проведено измерение температуры лазерно-индуцированной плазмы в газе при различном давлении.

M.A. TARASOVA, D.A. KOCHUYEV, K.S. KHORKOV,
V.G. PROKOSHEV, A.V. IVASCHENKO

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

INVESTIGATION OF LASER-INDUCED PLASMA CHARACTERISTICS

The paper studies the characteristics of laser-induced plasma channels. The temperature of the laser-induced plasma in the gas was measured at different pressures.

Для измерения температуры лазерно-индуцированной плазмы использовался цветовой микропирометр модели МП-1001. Данный прибор позволяет осуществлять измерение яркостной температуры в диапазоне от 1500 до 5000 К. Переход от яркостной температуры ($T_{я}$) к истинной ($T_{ист}$) осуществлялся в соответствии с формулой [1-3]:

$$T_{ист} = \frac{T_{я} \cdot C_2}{C_2 + \lambda T_{я} \cdot \ln \alpha},$$

где $\lambda = 650$ нм опорная/калиброванная длина волны, $C_2 = 0.014388 \text{ м} \cdot \text{К}$ вторая постоянная Планка, α – степень черноты (коэффициент поглощения). Степень черноты определялась путем измерения интенсивности проходящего опорного/зондирующего лазерного луча с длиной волны 650 нм через объем лазерно-индуцированного плазменного канала.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Использовалось излучение фемтосекундной лазерной системы с длиной волны 1030 нм. В ходе проведения эксперимента по измерению степени поглощения плазмы, был рассчитан коэффициент поглощения. На рисунке 2 представлен график зависимости истинной температуры от значений давления.

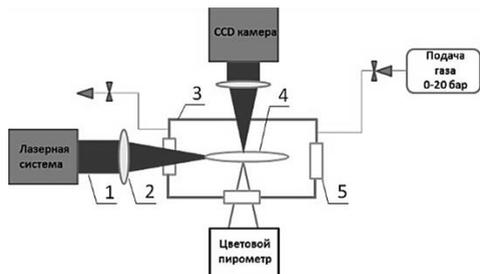


Рис.1. Схема эксперимента: 1 – лазерная система; 2 – фокусирующая линза; 3 – изолированный сосуд; 4 – область оптического пробоя и образования плазменного канала; 5 – входные и выходные окна в изолированном сосуде

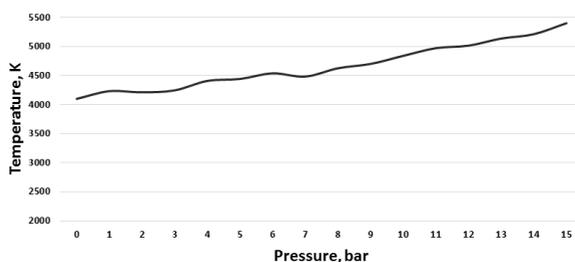


Рис.2. График зависимости истинной температуры от значений давления

Также в ходе работы была отслежена динамика формирования плазменных каналов.

Таким образом, в работе была разработана экспериментальная схема по измерению температуры лазерно-индуцированных плазменных каналов с использованием пирометра при различном давлении. Также разработана схема по измерению коэффициента поглощения плазмы. Получены значения температуры плазменных каналов, исследована динамика образования плазменных каналов.

Список литературы

1. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. – Томск, 2007. – 104 с.
2. Дубас Л.Г. Термометрическая пирометрия для измерений температуры излучателей // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. – 2018. – № 3. – С. 54-64.
3. Магунов А.Н. Измерение температуры объектов с неизвестной излучательной способностью методом спектральной пирометрии // Научное приборостроение. – 2010. – Т. 20. – № 3. – С. 22–26.

Ю.М. АЛИЕВ, А.А. ФРОЛОВ

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

ВОЗБУЖДЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ МОД В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДВУХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Построена теория генерации низкочастотных собственных поверхностных мод в слое разреженной плазмы при воздействии двухчастотного лазерного излучения. Показано, что существенное увеличение энергии низкочастотной собственной моды плазменного слоя происходит в условиях резонанса, когда частота этой моды совпадает с разностью лазерных частот. Установлено, что при выполнении условий резонанса плотность потока энергии, переносимой низкочастотной собственной модой, может быть сопоставима с интенсивностью лазерного излучения.

YU.M ALIEV, A.A. FROLOV

P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

THE EXCITATION OF LOW-FREQUENCY SURFACE MODES IN THE PLASMA LAYER UNDER ACTION OF TWO-FREQUENCY LASER RADIATION

The theory of low-frequency surface eigenmodes generation in a rarefied plasma layer under the action of two-frequency laser radiation is constructed. It is shown that a significant increase in the energy of the plasma layer low-frequency eigenmode occurs under resonance conditions, when the frequency of this mode coincides with the difference in laser frequencies. It is established that under the conditions of resonance the energy flux density carried by the low-frequency eigenmode can be comparable to the intensity of laser radiation.

Интерес к вопросам генерации и детектирования терагерцового (ТГц) излучения связан с возможностями его широкого использования в научных исследованиях и практических приложениях. В настоящее время при воздействии лазерного излучения на вещество получена энергия порядка миллиджоуля в импульсе ТГц излучения. При этом коэффициент конверсии энергии лазерного импульса в ТГц сигнал составляет несколько процентов. Возможность повышения энергии ТГц импульсов может быть связана с возбуждением собственных мод в веществе под действием лазерного поля, когда существенный вклад в энергию ТГц сигнала вносит сама материальная среда.

Исследовано возбуждение собственных мод плазменного слоя под действием двухчастотного лазерного излучения. В отличие от [1], где рассмотрено нормальное падение одного сфокусированного лазерного импульса конечной длительности, в настоящей работе мы рассматриваем наклонное падение двух лазерных волн постоянной амплитуды с близкими частотами на слой

разреженной плазмы в схеме симметричного облучения, когда вдоль границы слоя волны распространяются навстречу друг другу. В работе [1] возбуждение вытекающей моды происходит, когда собственная частота плазменного слоя близка к одной из частот Фурье-образа огибающей лазерного импульса, которая определяется его обратной длительностью. В рассмотренном ниже случае раскачка собственных поверхностных мод слоя происходит в условиях непосредственного резонанса, когда разность частот лазерных полей совпадает с частотой собственной моды плазменного слоя. Это приводит к тому, что в рассмотренной схеме облучения выражение для энергии низкочастотной моды содержит в знаменателе квадрат малой мнимой части дисперсионной функции. Это обстоятельство позволяет значительно повысить энергию низкочастотного излучения по сравнению с полученным в [1] результатом, где энергия содержит в знаменателе малую мнимую часть дисперсионной функции только в первой степени, что связано с интегрированием по всему спектру возбуждаемых колебаний. Отметим, что в рассмотренной ниже схеме облучения резонансное условие при большой толщине плазменного слоя оказывается выполненным, если разность частот лазерных полей равна $\omega_p / \sqrt{2}$, где ω_p - ленгмюровская частота электронов. Приведенные оценки показывают, что в условиях современных экспериментов рассмотренный механизм возбуждения собственных низкочастотных мод плазменного слоя позволяет получить излучение в терагерцовом диапазоне частот с плотностью потока энергии сравнимой с интенсивностью лазерного излучения.

Список литературы

1. Фролов А.А. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 4. С. 347.

И.А. ХРИСАНОВ, Ю.А. САТОВ, А.В. ШУМШУРОВ, А.А. ЛОСЕВ
НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА CO₂-ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ГЕНЕРАТОРА ПУЧКА ИОНОВ

Описано расчетно-теоретическое исследование оптической схемы формирования мощного короткого лазерного импульса в цепочке задающий генератор - резонансный нелинейный поглотитель - лазерный усилитель. Схема основана на эффекте «компрессии» лазерного импульса в процессе нелинейного усиления при условии создания определенного закона нарастания фронта импульса.

I.A. KHRISANOV, Yu.A. SATOV, A.V. SHUMSHUROV,
A.A. LOSEV

NRC «Kurchatov Institute» - ITEP, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF THE LASER SYSTEM FOR THE LASER ION BEAM GENERATOR

A theoretical study and simulation results of the optical scheme for generating a high-power short laser pulse in a chain of a master oscillator — a resonant nonlinear absorber — a laser amplifier is described. The scheme is based on the effect of "compression" of a laser pulse in the process of nonlinear amplification, provided that a special shape of rise of the pulse front is created.

Предлагаемая лазерная схема основана на эффекте «компрессии» лазерного импульса в процессе нелинейного усиления [1,2] при условии создания определенного закона нарастания фронта импульса. Необходимое для проявления этого эффекта формирование специальной формы импульса на линии P20-10 мкм полосы на входе в усилитель создается в нелинейно-поглощающей ячейке с газовой смесью SF₆+N₂. Создана феноменологическая модель распространения импульса излучения CO₂ лазера в резонансно-поглощающей среде. В рамках исследования проведена разработка и изготовлена поглощающая ячейка, расчетным путем оптимизированы ее параметры, что гарантирует существенное «укручение» фронта нарастания излучения при ее прохождении.

В работе экспериментально и расчетными методами проведено исследование изменения формы импульса излучения 3Г при распространении в резонансных средах поглотителя и усилителя в соответствии с оптической схемой на рис. 1.

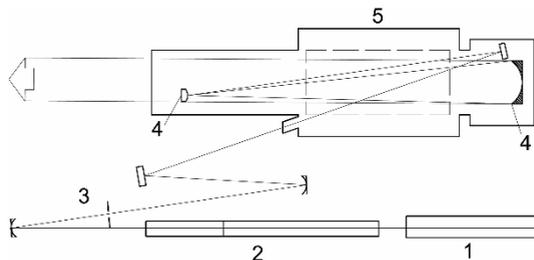


Рис. 1. Оптическая схема ЗГ-Л100. 1 – задающий генератор, 2 – поглощающая ячейка, 3 – пространственный фильтр, 4 – внеосевой телескоп, 5 – усилитель Л –100

Импульсы излучения стабилизированного генератора 1 [3] направлялись в поглощающую ячейку 2, где формировался «крутой» участок нарастания на его фронте. Для улучшения пространственной формы лазерного пучка и геометрического согласования с усилителем 5 применяется пространственный фильтр 3. Усиление импульса осуществляется по четырехпроходовой схеме с помощью внеосевого зеркального телескопа 4.

Для расчета поглощения в SF_6 использовалась упрощенная двухуровневая квантовая модель, входное излучение задавалось экспериментальной осциллограммой. Для настройки параметров расчета проводились сравнения измеренной и расчетной форм импульса. Расчет усиления проводился по модели [4].

Ожидается, что реализация схемы позволит получать импульсы CO_2 лазера с пиковой мощностью порядка 10 ГВт.

Разработанная технология формирования мощных импульсов обеспечить получение необходимого числа частиц Bi^{26+} - Bi^{31+} для нужд создаваемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ ускорительного комплекса.

Список литературы

1. Крюков П. Г., Летохов В. С. "Распространение импульса света в резонансно усиливающей (поглощающей) среде" УФН 99 169–227 (1969).
2. К. Н. Макаров, Д. Д. Малота, В. К. Рерих и др. «Исследование динамики распространения импульсов CO_2 лазера в цепочке нелинейных поглощающих и усиливающих сред». Квант. электр. Т. 31. №1. С. 23-29. (2001).
3. Ю. А. Сатов, Б. Ю. Шарков, Н. Н. Алексеев и др. «Стабилизированный CO_2 -лазер импульсно-периодического действия для лазерно-плазменного генератора высокозарядных ионов». ПТЭ. №3. С. 107-115. (2012).
4. G. T. Schappert. «Rotational relaxation effects in short-pulse CO_2 amplifiers». Appl. Phys. Lett. V. 23. n. 6. P. 319-321. (1973).

В.В. ШАРОГЛАЗОВА^{1,2,3}, Р.А. ШАХОВОЙ^{1,2}, А.В. УДАЛЬЦОВ^{1,2}, Ю.В.
КУРОЧКИН^{1,2}

¹*Российский квантовый центр, Москва, Россия*

²*КуРЭйт, Москва, Россия*

³*Сколковский институт науки и технологии, Москва, Россия*

СТОХАСТИЧЕСКИЕ СКОРОСТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ УРАВНЕНИЯ В КОНТЕКСТЕ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

Целью данной работы было исследование генерации оптических импульсов полупроводниковым лазером на частотах следования порядка нескольких ГГц. Рассмотрена система скоростных уравнений с включением Ланжевеновских членов, отвечающих за спонтанное излучение. Построена модель, описывающая интерференцию двух оптических импульсов и позволяющая исследовать наличие корреляций между их амплитудами и, как следствие, возможность генерации истинно случайных чисел.

V.V. SHAROGLAZOVA, R.A. SHAKHOVOY, A.V. UDALTSOV, Y.V.
KUROCHKIN

Russian Quantum Center, Moscow, Russia

QRate, Moscow, Russia

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

STOCHASTIC LASER RATE EQUATIONS IN THE CONTEXT OF QUANTUM RANDOM NUMBER GENERATOR

The aim of this work was to investigate the generation of optical pulses by a semiconductor laser at repetition frequencies of the order of several GHz. A system of rate equations with the inclusion of the Langevin terms responsible for spontaneous emission was considered. A model that describes the interference of two optical pulses and allows to investigate the presence of correlations between their amplitudes and, as a result, the possibility of generating truly random numbers was constructed.

За последние два десятилетия было реализовано множество квантовых генераторов случайных чисел (КГСЧ), использующих в качестве источника энтропии шум полупроводниковых лазеров. В разрабатываемом КГСЧ фазовые флуктуации лазерного излучения преобразуются в амплитудную модуляцию посредством интерференции двух импульсов, излучаемых лазером в разные моменты времени. Для этого последовательность оптических импульсов заводится в несбалансированный интерферометр Майкельсона. Главным требованием для работы такой схемы является то, что после каждого импульса лазер должен переходить в режим усиления спонтанного излучения (УСИ). Поскольку большинство переходов в режиме УСИ являются спонтанными, фазовые корреляции электромагнитного поля разрушаются очень быстро, так что каждый новый лазерный импульс появляется со случайной фазой, а

результат их интерференции становится случайной величиной. Для того, чтобы показать это строго, необходимо решить систему скоростных уравнений для полупроводникового лазера [1]:

$$\begin{cases} \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2\tau_{ph}}(1+i\alpha)(G-1)E + F_E(t), \\ \frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_e} - \frac{GQ}{\tau_{ph}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $E(t)$ – электромагнитное поле, τ_{ph} – время жизни фотона, α – коэффициент Генри, G – нормированный коэффициент усиления, $F_E(t)$ – комплексная сила Ланжевена, описывающая (гауссовский) белый шум, N – число носителей (электронов), I – ток накачки, e – заряд электрона, τ_e – время жизни носителей, Q – число фотонов в резонаторе.

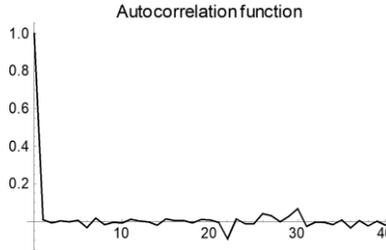


Рис. 1. Автокорреляционная функция сигнала, соответствующего результату интерференции пары соседних импульсов

Система (1) решена для частоты следования оптических импульсов 2.5 ГГц. Как видно из рис.1 сигналы, соответствующие результатам интерференции оптических импульсов не коррелированы.

Список литературы

1. Van Tartwijk G. H. M., Lenstra D. Semiconductor lasers with optical injection and feedback //Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B. – 1995. – Т. 7. – №. 2. – С. 87.

П.В. ШАХОВ, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Д.А. ЗАЗЫМКИНА,
С.И. КУДРЯШОВ, Э. Р. ТОЛОРДАВА, А.А. ИОНИН, А.А. РУДЕНКО,
Д.А. ЗАЯРНЫЙ

*Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук ФИАН, Москва,
Россия*

АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КОЛЛОИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Рассмотрен процесс получения коллоидных растворов наночастиц, таких как золото, серебро, медь методом лазерной абляции в жидкости. Исследованы свойства наночастиц и их антибактериальная активность. Изучено бактерицидное воздействие коллоидных растворов наночастиц на планктонные клетки микроорганизмов.

P.V. SHAHOV, A.A. NASTULYAVICHUS, D.A. ZAZYMKINA, S.I.
KUDRYASHOV, E. R. TOLORDAVA, A.A. IONIN, A.A. RUDENKO, D.A.
ZAYARNY

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

ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF COLLOID NANOPARTICLES

The process of obtaining colloidal solutions of nanoparticles, such as gold, silver, copper, by method of laser ablation in a liquid is considered. The properties of nanoparticles and their antibacterial activity are investigated. The bactericidal effect of colloidal solutions of nanoparticles on plankton cells of microorganisms was studied.

В настоящее время серьезной проблемой является повышение резистентности различных штаммов бактерий к антибиотикам [1]. Биопленки, которые представляют собой хорошо организованное, взаимодействующее сообщество микроорганизмов, особенно опасны. Опасность заключается в повышенной устойчивости бактерий в биопленках к методам борьбы с ними. В природе биопленки распространены повсеместно. Поэтому поиск новых методов является важной задачей. Известно, что многие наночастицы обладают антибактериальными свойствами [2].

Целью данного исследования является наработка коллоидных цитотоксических наночастиц в жидкости в целях предотвращения формирования и устранения биопленок патогенных микроорганизмов. В работе использовался наносекундный волоконный лазер НТФ MARK (Булат) на ионах Yb^{3+} с длительностью импульса на полувывоте 120 нс, максимальной энергией в импульсе 1мДж и частотой повторения импульсов до 80 кГц. Были получены и исследованы коллоидные растворы наночастиц: золота, серебра, меди. На рис.1

представлена визуализация наночастицы золота, полученная с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

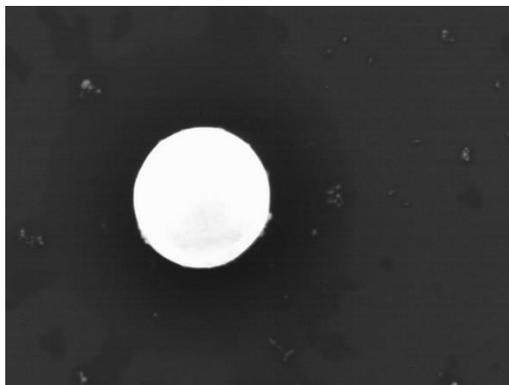


Рис 1. СЭМ визуализация наночастиц золота, осажденных на поверхности кремния из коллоидного раствора

Изучение бактерицидного воздействия коллоидных растворов наночастиц на планктонные клетки микроорганизмов (*S. aureus* и *P. aeruginosa*) определяли общепринятым в микробиологии диско - диффузионным методом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 18-15-00220).

Список литературы

1. A. Giedraitienė et al., *Medicina* (Kaunas).2011, 47(3) 137-46.
2. Nastulyavichus et al., *Applied Surface Science*. 2019, 269, 220-225

А.С. ЩЕКИН¹, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, И. Н. ШИГАНОВ², С.А. КОТОВ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Баумана, Москва, Россия

³НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ МНОГОПРОХОДНОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Проведены экспериментальные исследования по резке в многопроходном режиме конструкционных стеклопластиков толщиной 3-8 мм излучением непрерывного волоконного иттербиевого лазера. Рассмотрено влияние алгоритма перемещения сфокусированного светового пятна на производительность и качество обработки.

A.S. SHCHEKIN¹, V.N. PETROVSKIJ¹, I.N. SHIGANOV², S.A.KOTOV³

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

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³NTO «IRE-Polus», Fryazino, Russia

INFLUENCE OF MULTI-PASS STRATEGIES ON THE QUALITY OF LASER CUTTING OF CONSTRUCTION GFRP

Experimental studies were carried out on cutting in multi-pass mode of construction Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) with a thickness of 3-8 mm by a continuous fiber ytterbium laser radiation. The influence of the strategy for moving a focused light spot on the performance and quality of processing is considered.

Изделия из конструкционных стеклопластиков находят широкое применение в транспортном машиностроении и строительстве, в частности при изготовлении дорожных шумозащитных экранов, огнестойких интерьерных панелей железнодорожного транспорта и элементов кровли. На финальном этапе изготовления изделий из стеклопластиков, возникает необходимость в дополнительной размерной обработке по формированию в них пазов и отверстий различного назначения. Лазерная резка является альтернативой традиционным способам обработки и характеризуется рядом преимуществ: отсутствие расходных материалов, сменного инструмента, ограничений на контур реза, форму и габарит детали, механического воздействия на заготовку в процессе обработки.

В работе использовалась экспериментальная технологическая установка на базе непрерывного волоконного иттербиевого лазера с длиной волны излучения 1,06 мкм и мощностью 1 кВт, и двухосевого гальваносканера с фокусирующим объективом с F=254 мм [1].

В качестве исследуемых материалов были использованы стеклопластики толщиной от 3 до 8 мм с полимерными матрицами из полиэфирной, винилэфирной и эпоксидной смолами. Для оценки качества обработки проводилось исследование дефектов макрогеометрии: ЗТВ и конусность и микрогеометрии: шероховатость, расслоение, растрескивание канала лазерного реза.

В результате исследований установлено:

- технология многопроходной лазерной резки стеклопластиков с расширением канала реза обеспечивает высокое качество и производительность: ЗТВ ≤ 50 мкм, конусность ≤ 150 мкм, класс чистоты поверхности не хуже 3-его, отсутствие сколов, трещин и расслоения, скорость резки до 500 мм/мин;
- Уменьшение конусности и шероховатости поверхности канала лазерного реза достигается за счет применения встречного двунаправленного алгоритма перемещения сфокусированного светового пятна.

Список литературы

1. Котов, С.А. Оценка зоны термического влияния при обработке углепластиков непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера / С.А. Котов, Н.А. Лябин, М.А. Казарян // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2019. – №2. – с. 53-60

И.А. ЩУКАРЕВ¹, Д.А. КОРОБКО¹, М.Ю. САЛГАНСКИЙ²,
И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ¹, П.П. МИРОНОВ¹

¹Ульяновский государственный университет, Россия

²Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых Российской академии наук,
Нижегород, Россия

ГЕНЕРАЦИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Исследована эволюция лазерного импульса в волоконном усилителе с нормальной дисперсией. Рассмотрены случаи идеального, однородного по спектру усиления, и усиления с ограничением по спектру. Показано, что трансформация огибающей входного импульса к параболическому виду возможна не только для спектрально-плоского, но и для спектрально-ограниченного усиления.

I.A. SHCHUKAREV¹, D.A. KOROBKO¹, M.YU. SALGANSKI²,
I.O. ZOLOTOVSKI¹, P.P. MIRONOV¹

¹Ulyanovsk State University, Russia

²G.G. Deviatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS

GENERATION OF PARABOLIC LASER PULSES IN FIBRE AMPLIFIERS

The laser pulse evolution in a normal-dispersion fibre amplifier is studied. The cases of ideal spectrum-homogeneous and transform-limited amplification are considered. It is shown that the envelope transformation of the input pulse to a parabolic form is possible not only for spectrally-flat amplification, but also for transform-limited one.

Технологии импульсных волоконных лазеров и усилителей в настоящее время востребованы в широком круге приложений [1, 2]. Распространение сигнала в усилителе описывается уравнением Гинзбурга-Ландау для комплексной амплитуды поля $A(z, t)$ [3]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{\beta_2 - ig/\Omega_g}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma |A|^2 A = gA \quad (1)$$

где z – продольная координата, t – время в бегущей системе координат, $\beta_2 > 0$ – коэффициент нормальной ДГС, γ – параметр керровской нелинейности волокна, g – инкремент усиления, Ω_g определяет ширину линии усиления (в с^{-1}). В качестве начального импульса используется спектрально-ограниченный гауссов импульс длительностью $\tau = 0.3$ пс, пиковая мощность $P = 100$ Вт, $\gamma = 6 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, $\beta_2 = 50 \text{ пс}^2/\text{км}$, $g_0 = 0.88 \text{ м}^{-1}$

Уравнение (1) с указанными параметрами было промоделировано стандартным SSF (split step Fourier) методом [3]. Как можно видеть, импульс в начальной фазе усиления далек от асимптотики (рис. 1(a)). Фактическое совпадение результатов моделирования с асимптотикой наступает после прохождения нескольких метров в усиливающем волокне (рис. 1(b)).

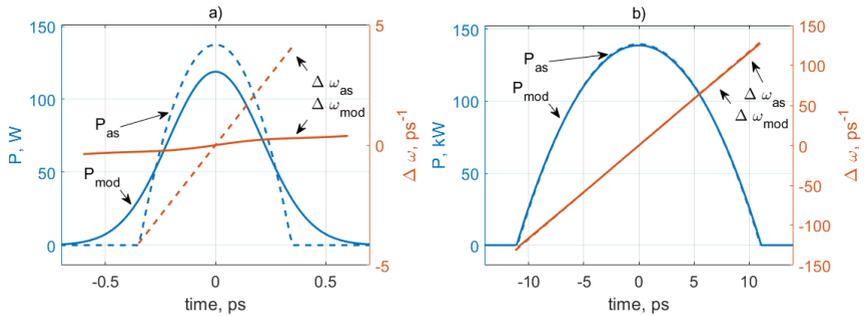


Рис. 1. Плоское по спектру усиление без насыщения. Импульс и изменение его мгновенной частоты на длине усилителя $L = 0.1$ м (а) и 6 м (б).
 Результаты моделирования – сплошные, расчет по асимптотическим выражениям – штриховые линии

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-42-730013).

Список литературы

1. Fermann M.E., Hartl I. // Nature photonics. 2013. №7. P. 868.
2. Gumenyuk R, Okhotnikova E. O., Filippov V., Korobko D. A., Zolotovskii I. O., Guina M. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. №24. P. 0901914.
3. Agrawal G. Nonlinear fiber optics Springer, fourth edition, 2007.
4. Dudley J.M., Finot C., Richardson D.J., Millot G. // Nat. Phys. 2007. №3. P. 597.

Секция
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

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

Секретарь секции – инженер кафедры №21
Хомяков А.Ю

Тел. : 8 (495) 788-56-99, доб. 9321

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

Д.Г. АГЕЙЧЕНКОВ¹, А.В. КАЗИЕВ¹, Д.В. КОЛОДКО^{1,2}, СЕРГЕЕВ Н.С.¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, МО, Россия

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ AZO ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ НА СТЕКЛЯННЫЕ ПОДЛОЖКИ В СТАЦИОНАРНОМ, ВЫСОКОЧАСТОТНОМ И БИПОЛЯРНОМ РЕЖИМАХ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

В данной работе рассмотрены различные способы нанесения прозрачного проводящего покрытия из оксида цинка, легированного алюминием (AZO) на стеклянные подложки магнетронным методом осаждения в режиме постоянного тока, в высокочастотном режиме и биполярном среднечастотном режиме. Во всех экспериментах покрытие наносится путем распыления спеченной керамической мишени ZnO:Al (с соотношением 98:2) в атмосфере инертного газа Ar (99,998%). В ходе работы были оценены показатели прозрачности, удельного и поверхностного сопротивления покрытий. Поверхность образцов также проанализирована при помощи сканирующего электронного микроскопа.

D.G. AGEYCHENKOV¹, A.V. KAZIEV¹, D.V. KOLODKO^{1,2} SERGEEV N.S.¹

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

²Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS, Fryazino, Moscow
regionRussia

COMPARISON OF THE PARAMETERS OF THIN AZO COATINGS DEPOSITED ON GLASS SUBSTRATES IN DC, RF, AND BIPOLAR MAGNETRON DISCHARGES

In this paper, various magnetron deposition methods for applying a transparent conductive coating of zinc oxide doped with aluminum (AZO) on glass substrates such as the direct current mode, the radiofrequency mode, and the bipolar medium frequency mode are considered. In all experiments, the coatings were deposited by sputtering a sintered ZnO:Al (98:2) ceramic target in Ar gas atmosphere (99,998%). During the work, the transparency, resistivity and sheet resistance of the coatings were evaluated. The surface of the samples was also analyzed using a scanning electron microscope.

Для получения тонких плёнок ZnO с примесью Al применяют различные методы: распыление, химическое осаждение из пара (CVD), импульсное лазерное осаждение, золь-гель процесс. Благодаря многим преимуществам, таким как простота процесса, низкая стоимость производства, низкая температура и высокая воспроизводимость, для осаждения тонких плёнок AZO в коммерческих приложениях, как правило, применяют магнетронное распыление. Различные режимы магнетронного разряда могут как

положительно, так и отрицательно сказываться на структуре осаждаемого покрытия, а также влиять на его физические свойства, в частности, на удельное сопротивление и прозрачность в видимом диапазоне. Использование в данной работе спеченной керамической мишени ZnO:Al (98:2) позволяет сравнить, в первую очередь, различные режимы магнетронного разряда.

Для осаждения покрытий применялась конфокальная магнетронная распылительная система на базе магнетрона PINCH MAGNETO-3GABS с круглыми мишенями диаметром 75 мм. Для осаждения покрытий выбиралась конфигурация с максимальной плотностью ионного тока на подложку и далее в процессе работы не менялась.

Все полученные покрытия продемонстрировали хорошее качество и практически полное отсутствие посторонних примесей в составе. Поверхностное сопротивление образцов R_s измерялось методом Ван дер Пау. Для этого был спроектирован и изготовлен прототип измерителя сопротивления. Источником питания служил блок MASTECH HY3010. Ток и напряжение измерялись цифровыми мультиметрами Fluke 179. Схема измерений показана на рис. 1).

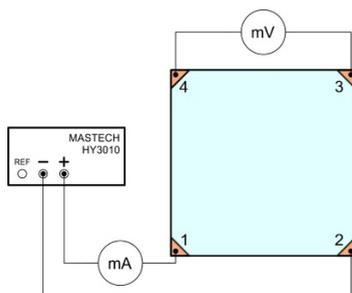


Рис. 1. Схема измерений поверхностного сопротивления по методу ван дер Пау

Н.С. АХМАДУЛЛИНА¹, Н.Н. СКВОРЦОВА^{2,3}, Е.А. ОБРАЗЦОВА³, В.Д. СТЕПАХИН², Е.М. КОНЧЕКОВ², Ю.Ф. КАРГИН¹, А.А. КОНОВАЛОВ¹, О.Н. ПИШИЛОВ⁴

¹ *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия*

² *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

³ *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

⁴ *Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова (МИРЭА), Москва, Россия*

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СМЕСЯХ ПОРОШКОВ «МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО» И «МЕТАЛЛ-НЕОРГАНИЧЕСКАЯ СОЛЬ», ИНИЦИИРУЕМЫЕ ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГИРОТРОНА

Приведены результаты исследования плазмохимических процессов, инициируемых импульсным излучением гиротрона в смесях порошков Al/меламин и Al/NH₄Cl. Показано, что микроволновой разряд в обоих случаях может быть инициирован, при этом порог инициации по энергии демонстрирует линейную зависимость от объемной доли металла в смеси.

N.S. AKHMADULLINA¹, N.N. SKVORTSOVA^{2,3}, E.A. OBRAZTSOVA³, V.D. STEPACHIN², E.M. KONCHEKOV², YU.F. KARGIN¹, A.A. KONOVALOV¹, O.N. SHISHILOV⁴

¹ *Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the RAS, Moscow, Russia*

² *Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia*

³ *National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

⁴ *Russian Technology University, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies (MIREA), Moscow, Russia*

PLASMA-CHEMICAL PROCESSES IN THE MIXTURES “METAL-ORGANIC COMPOUND” AND “METAL-INORGANIC SALT” INITIATED BY PULSE RADIATION OF GYROTRON

Results of the study of plasma-chemical processes initiated by pulsed radiation of gyrotron in the powders mixtures Al/melamine and Al/NH₄Cl are presented. It was shown that a microwave discharge in both cases can be initiated, while the energy initiation threshold demonstrates a linear dependence on the volume fraction of metal in the mixture.

Плазмохимические методы играют существенную роль в современном материаловедении. Как правило, используется низкотемпературная плазма ($T \leq 10^4$ K), которая может быть генерирована, в частности, при обработке импульсами мощного микроволнового излучения смесей порошков металл-

диэлектрик [1,2,3]. Эксперименты были выполнены на плазмохимическом комплексе МИГ-3, представляющем собой электрон-циклотронную систему нагрева плазмы стелларатора Л-2М с гиротроном 75/0.8 (75 ГГц, импульс 1...12 мс, мощность до 550 кВт) [2]. Импульс гиротрона посредством системы медных зеркал (квазиоптический тракт) направляется в специально разработанный плазмохимический реактор [3].

Ранее было показано, что разряд в смесях Al/Al₂O₃ с добавкой меламина C₃H₆N₆ в качестве источника атомарного азота приводил к образованию оксонитридных фаз AlON [4]. В продолжение нами были изучены смеси Al/меламин с молярными соотношениями 1/1, 2/1 и 3/1. Во всех случаях удалось инициировать разряд при минимальной длительности импульса (2 мс), при этом порог по энергии для инициации разряда линейно зависит от объемной доли Al в смеси (рис. 1). Рентгенофазовый анализ вещества, напыляющегося на стенки реактора, показал, что он состоит из мет. Al и меламина (рис. 1), т.е. исходных компонентов.

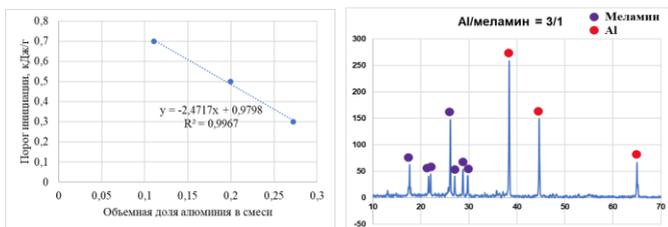


Рис. 1. Слева: Зависимость порога инициации от объемной доли алюминия; справа: Дифрактограмма вещества, осажденного на стенках реактора

В смесях Al/Al₂O₃/NH₄Cl (1/2/2 и 1/2/4) разряд также инициируется при длительности импульса в 2 мс с порогом < 1 кДж/г. Рентгенофазовый анализ вещества, напыляющегося на стенки реактора, показывает следовые количества оксонитридных фаз, в т.ч. Al₁₁O₁₅N. Ранее аналогичная фаза была обнаружена в продуктах обработки смесей Al/Al₂O₃/меламин [4]

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-33-01097.

Список литературы

1. Batanov G.M., Belousov V.I., Bondar' Yu.F., et al. // *Plasma Phys. Rep.* 2013. V. 39. Is. 13. P. 1088–1095.
2. Batanov G.M., Borzosekov V.D., Golberg D., et al. // *J. Nanophoton.* 2016. V.10 (1). 012520.
3. Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., et al. // *J. Nanoelectron. Optoelectron.* 2013. V. 8. P. 58–66.
4. Akhmadullina N.S., Skvortova N.N., Obratsova E.A., et al. // *Chem. Phys.* 2019. V. 516. P. 63–70.

О.А. БАШУТИН, Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ, П.П. СИДОРОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

Проводилось изучение плазмы оболочки вакуумной искры. При пинчевании плазмы наблюдается возникновение высокочастотных колебаний в диапазоне 1-100 МГц. Зарегистрированы спектры электромагнитного излучения плазмы в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Исследовалась микроструктура поверхности электродов. На поверхности электродов фиксируются характерные возвышения с размерами 10-50 мкм. Вместе с тем происходит образование ячеек с размерами 0,1-0,3 мкм.

O.A. BASHUTIN, D.L. KIRKO, A.S. SAVJOLOV, P.P. SIDOROV

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

INVESTIGATION OF NEAR ELECTRODE PLASMA OF VACUUM SPARK

The research of plasma cover of a vacuum spark was realized. The origin of high frequency oscillations in region 1-100 MHz was observed during the plasma pinching. Spectra of visible and ultraviolet radiation of the plasma were registered. The micro structure of electrode surface was researched. Typical hills with dimensions 10-50 μm are fixed at the surface of electrodes. So the origin of cells with dimensions 0,1-0,3 μm is observed.

Одним из направлений работ, связанных с вакуумной искрой являются исследования возникновения плазменных точек или микропинчей [1-3]. Данный разряд обладает интенсивным излучением в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах спектра. Эксперименты проводились на установке, содержащей накопительный конденсатор емкостью 10 мкФ при зарядном напряжении 10-20 кВ. Включение разряда производилось с помощью триггерного поджига. Электроды содержали анод диаметром 3-4 мм заостренной формы, и катод цилиндрической формы с отверстием 1,0-2,5 мм в центре. В опытах использовались электроды, изготовленные из стали или меди. Расстояние между электродами выбиралось в пределах 3-6 мм. Давление в камере было в диапазоне 10^{-4} - 10^{-5} Тор. Ток разряда составлял 80-140 кА при периоде разряда 6,0 мкс.

Вблизи максимума тока происходит пинчевание разряда и образование перетяжки тока. При этом излучается рентгеновское излучение с энергией квантов: $E > 1$ кэВ. В данный момент возникают высокочастотные колебания в широком диапазоне спектра [4,5]. Основными частотами данных колебаний являлись следующие: $8,5 \pm 0,2$ МГц, 38 ± 1 МГц, 47 ± 1 МГц, 94 ± 2 МГц. Наиболее интенсивными линиями элементов, входящих в состав электродов, являются

линии атомов железа: Fe I 298 nm, 382 nm; ионов железа: Fe II 270 nm, 361 nm, 523 nm; ионов кремния: Si II 305 nm; атомов углерода C I 601 nm. Вместе с тем регистрируются водородные линии H_{α} 656 nm и H_{γ} 434 nm и сильный непрерывный спектр. Было сделано предположение, что для плазмы разряда справедлива модель локального термического равновесия. С помощью метода относительных интенсивностей спектральных линий водородных линий H_{γ} и H_{α} были рассчитаны значения температуры плазмы для различных режимов разряда. Для разряда при зарядном напряжении $U_3=16$ кВ было получено значение температуры $T=8700\pm 300$ К. Данное значение температуры более чем на порядок ниже величин, существующих в области пинча.

Микроструктура поверхности электродов исследовалась с помощью электронных микроскопов Hitachi TM1000 и VEGA 3 SEM. Общий рельеф поверхности анода состоит из характерных возвышений (“холмов”) неправильной формы с размерами 20-150 мкм. Оценка высоты данных образований составляет 10-50 мкм. Вершины большинства больших плоских “холмов” содержат вкрапления неправильной формы размерами 1-10 мкм, состоящие из углерода. Проводилось исследование пространства между рассмотренными “холмами”. Данные “ложбины” содержат более ровную поверхность, разделенную темными углеродными полосами с шириной 0,1-1 мкм. Пространство между данными темными полосами состоит из овальных ячеек с размерами в диапазоне 80-350 нм. Ввиду пустых пространств между ячейками можно предположить, что высота данных ячеек больше их размеров или более 100-200 нм. Происходит чередование областей с ячейками размерами в диапазоне 80-150 нм и более крупными ячейками с размерами 200-350 нм.

Список литературы

1. Cilliers W.A., Datla R.U., Griem H.R. // Phys. Rev. A, 1975, Vol.12, P. 1408.
2. Koshelev K.N., Pereira N.R. // J. Appl. Phys., 1991, Vol.69, P. 21.
3. Башутин О.А., Савелов А.С. // Физика плазмы, 2016, Т.42, №4, С. 352-360.
4. Кирко Д.Л., Савелов А.С. // Изв. высш. учеб. зав. Физика, 2014, Т. 57, № 11, С. 3-6.
5. Kirko D.L., Savjолоv A.S. // J. Phys.: Conf. Ser., 2018. Vol. 1115, P. 022010.

Н.Н. БОГАЧЕВ¹, Н.Г. ГУСЕЙН-ЗАДЕ¹, И.В. ЖЛУКТОВА¹,
С.Ю. КАЗАНЦЕВ², В.А. КАМЫНИН¹, С.В. ПОДЛЕСНЫХ¹,
С.А. ФИЛАТОВА¹, Д.В. ШОХРИН³

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

²*Московский технический университет связи и информатики, Москва*

³*МИРЭА - Российский технологический университет, Москва*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ АНТЕНН

Проанализированы, известные из литературы, применения лазеров для формирования плазменных антенн. Проведено сравнение характеристик плазмы, создаваемой с помощью лазера и на основе обычных газоразрядных устройств. Показано, что применение лазера позволяет формировать плазменные антенны с более широким диапазоном управляемых характеристик. Наиболее высокие эффективность генерации плазмы и легкость управления характеристиками может быть достигнуто в лазерных полупроводниковых плазменных антеннах. Разработаны методики для исследования прямо-передающих характеристик лазерных полупроводниковых антенн и представлены результаты исследований их характеристик.

N.N. BOGACHEV¹, N.G. GUSEIN-ZADE¹, I.V. ZHLUKTOVA¹,
S. Yu. KAZANTSEV², V.A. KAMYNNIN¹, S.V. PODLESNYKH¹,
S.A. FILATOVA¹, D.V. SHOKHRIN³

¹*Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow*

²*Moscow technical university of communications and informatics, Moscow*

³*MIREA—Russian Technological University, Moscow*

THE APPLICATION OF LASERS FOR THE FORMATION OF PLASMA ANTENNAS

The applications of lasers for the formation of plasma antennas, known from the literature, are analyzed. The characteristics of laser plasma and plasma created on the basis of conventional gas-discharge devices are compared. It is shown that the use of laser allows to create plasma antennas with a wider range of controlled characteristics. The highest plasma formation efficiency and ease of control characteristics can be achieved in laser semiconductor plasma antennas. Methods have been developed to study the receiving and transmitting characteristics of laser semiconductor antennas. The first results of theoretical and experimental studies of the characteristics of laser semiconductor antennas are presented.

При разработке перспективных радиотехнических и телекоммуникационных устройств сейчас интенсивно исследуются различные типы плазменных антенн [1-3]. Основные физические принципы, лежащие в основе применения плазменных антенн рассмотрены в [2]. Ранее, основные экспериментальные исследования проводились, когда в качестве антенн использовалась газоразрядная плазма, получаемая в условиях пониженного давления газа [3], а

лазер применялся лишь при создании волноводов для СВЧ-пучков [4, 5]. В работе [6] нами были предложены лазерные полупроводниковые плазменные антенны (ЛППА). Предложенный подход к созданию материалов с управляемыми электромагнитными характеристиками имеет перспективы для применения в радио-, СВЧ и ТГц спектральных диапазонах. Поэтому в ближайшее время ожидается, что, благодаря развитию ЛППА произойдет качественный скачок в области практических применений плазменных антенн, а также к созданию быстрой управляемой оптики для излучения СВЧ и ТГц спектральных диапазонов. В частности, ЛППА имеют высокий потенциал в системах спутниковой связи, где актуально обеспечение быстрого интерфейса между низкоорбитальными спутниками и наземными станциями [7], а также при построении систем беспроводной связи ТГц частотного диапазона [8].

Одной из целей настоящей работы являлось разработка эффективных методик и создание экспериментального стенда для исследования характеристик ЛППА. Проработан общий облик экспериментального стенда для исследования приемо-передающих характеристик ЛППА, а также полупроводниковых структур в ЛППА. Предложена концепция создания материалов с управляемым поглощением в области СВЧ и ТГц спектральных диапазонов. Проведены теоретические оценки, которые подтверждают высокий практический потенциал таких материалов.

Список литературы

1. Anderson T. (2011). Plasma antennas. Artech House.
2. Гусейн-заде Н.Г., Минаев И.М. и др. // *Радиотехника и электроника*. 2011. Т. 56(10), С. 1216-1220
3. Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л. и др. // *Физика плазмы*. 2015. Т. 41(10), С. 860-866.
4. Alshershby M., Hao Z., et. al. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012. V. 45(26), P. 265401.
5. Zvorykin V.D., Ionin A.A. et al. // *Plasma physics reports*. 2015. V. 41(2), P. 112-146.
6. Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2019, Т.45 (24). С.6-9.
7. Алешин В. С., Догаев С. Г. // *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*. – 2019. – Т. 13. – №. 5.
8. Biryukov V.V. et al. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2019. – Т. 61. – №. 10. – С. 763-772.

К.Ю. ВАГИН, С.А. УРЮПИН

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

**ВОЛНЫ И НЕУСТОЙЧИВЫЕ МОДЫ В ПЛАЗМЕ,
ОБРАЗОВАННОЙ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ
АТОМОВ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА**

Изучены высокочастотные коллективные моды в плазме с сильно анизотропным неравновесным распределением фотоэлектронов по скоростям, образованным при многофотонной ионизации атомов газа.

K.YU. VAGIN, S.A. URYUPIN

P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

**WAVES AND UNSTABLE MODES IN PLASMA FORMED BY
MULTIPHOTON IONIZATION OF RAREFIED GAS ATOMS**

High-frequency collective modes in plasma with strongly anisotropic non-equilibrium velocity distribution of photoelectrons formed by multiphoton or above-threshold ionization of gas atoms are studied.

Воздействие на газы короткими лазерными импульсами с плотностью потока энергии $10^{12} \div 10^{13} \text{Вт/см}^2$ приводит к многофотонной ионизации атомов. В случае линейно поляризованного ионизирующего излучения образуется слабоионизованная плазма с сильно анизотропным дискретным распределением фотоэлектронов по энергии, состоящим из набора отдельных пиков, каждый из которых отвечает поглощению определенного числа фотонов. В условиях разреженного газа, когда в течение весьма широкого временного интервала редкие столкновения электронов не существенны и такое распределение слабо меняется, нами изучены коллективные электронные моды, которые могут возбуждаться в плазме с одним энергетическим пиком в распределении фотоэлектронов, соответствующим пороговому режиму многофотонной ионизации атомов газа.

Показано, что в такой плазме, наряду с обычной электромагнитной волной, есть еще две моды. В области больших длин волн более высокочастотная мода подобна электронной ленгмюровской волне. В коротковолновой области закон дисперсии этой моды близок к линейному, что соответствует электронному звуку. При этом групповая и фазовая скорости этой волны близки к средней скорости фотоэлектронов. Вторая мода, имеющая меньшую частоту, в области длин волн меньших отношения средней скорости электронов к плазменной частоте, отвечает квазипотенциальной волне, а ее закон дисперсии также близок к линейному. Затухание обеих мод определяется черенковским механизмом взаимодействия волн и электронов и в коротковолновой области нарастает

сравнительно медленно. Напротив, в области больших длин волн самая низкочастотная мода отвечает аperiодической неустойчивости, максимальный инкремент которой сравним с плазменной частотой. Эта неустойчивость подобна двухпотоковой неустойчивости. Рис. 1 иллюстрирует особенности законов дисперсии и инкремента описанных выше электронных мод от продольного относительно оси анизотропии фотоэлектронного распределения волнового числа k_z на примере плазмы газа Xe.

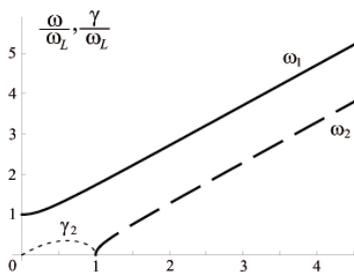


Рисунок 1

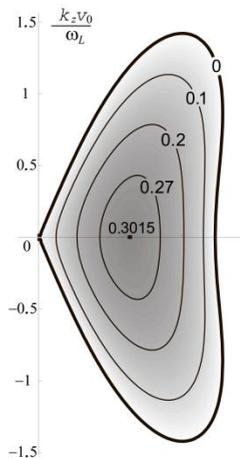


Рисунок 2

На рис. 2 в области $k_z > 0$ в плоскости отличных от нуля компонент волнового вектора представлена область неустойчивости низкочастотной моды и линии уровня ее безразмерного инкремента, отнесенного к электронной ленгмюровской частоте.

Многообразие видов электромагнитных мод и своеобразие их свойств в фотоионизированной плазме, образованной при многофотонной ионизации атомов газа, является следствием анизотропного многопикового распределения фотоэлектронов.

Список литературы

1. Vagin K. Yu., Uryupin S.A. // Plasma Sources Science and Technologies, 2020.

Е.В. ВОРОНОВА¹, В.Д. БОРЗОСЕКОВ¹, Н.Н. СКВОРЦОВА^{1,2}

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

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва, Россия*

ЭРГОДИЧНОСТЬ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛАЗМЫ ПРИ МНОГОИМПУЛЬСНОМ ЭЦР НАГРЕВЕ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Проведено исследование эргодичности временных выборок флуктуаций плотности плазмы ($k = 1 - 30 \text{ см}^{-1}$) и низких мод флуктуаций краевого магнитного поля при многоимпульсном электронно-циклотронном резонансном нагреве в стеллараторе Л-2М. Определены минимальные длины выборок для проведения дальнейшего статистического анализа параметров турбулентности высокотемпературной плазмы. Выявлено увеличение временного интервала эргодичности в течение разряда от первого импульса нагрева к последнему. Сделано заключение о возможности объединения временных выборок флуктуаций в соседних импульсах нагрева для проведения R/S анализа.

E.V. VORONOVA¹, V.D. BORZOSEKOV¹, N.N. SKVORTSOVA^{1,2}

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

²*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

ERGODICITY OF PLASMA FLUCTUATIONS AT MULTI-PULSE ECR HEATING IN THE L-2M STELLARATOR

The ergodicity of time samples of turbulent density fluctuations with spatial dimensions $k = 1 - 30 \text{ cm}^{-1}$ and low-number modes of the fluctuations of the edge magnetic field was studied at multi-pulse electron-cyclotron resonance heating in the L-2M stellarator. The minimum sample lengths for further statistical analysis of the turbulence of high-temperature plasma were determined. An increase in the ergodicity time interval during the discharge from the first heating pulse to the last was revealed. It is concluded that it is possible to combine time samples of fluctuations from different heating pulses for R/S analysis.

При многоимпульсном электронно-циклотронном резонансном (ЭЦР) нагреве плазмы на стеллараторе Л-2М в течение каждого отдельного импульса нагрева наблюдаются характерные изменения потерь энергии [1] и взаимодействия плазмы со стенкой [2]. Было выявлено изменение спектров флуктуаций [1], что указало на необходимость анализа статистических характеристик турбулентности. Расчет [3] эволюции четвертого статистического момента (M4) временных выборок флуктуаций плотности выявил превышение им трех, что указывает на возможное наличие крупномасштабных событий (функции влияния) и невозможность описания турбулентного потока тепла с помощью обобщенного закона Фика.

Флуктуации плотности нескольких пространственных масштабов ($k = 1, 2, 20, 30 \text{ см}^{-1}$) в различных областях плазменного шнура (вдоль центральной хорды, в центре, на краю) измерялись методом коллективного рассеяния микроволнового

излучения. Пример амплитуд флуктуаций плотности с $k = 20 \text{ см}^{-1}$ приведен на рисунке. Флуктуации магнитного поля низких МГД мод в краевых областях плазмы регистрировались магнитными зондами.



Регистрация мощности рассеянного микроволнового излучения на флуктуациях плотности с $k = 20 \text{ см}^{-1}$ из центра плазменного шнура при трехимпульсном ЭЦР нагреве (черная кривая – усреднение сигнала 100 мкс скользящим окном.)

В настоящей работе методом расчета моментов распределения в нарастающем окне [4] были проанализированы интервалы эргодичности (минимальная длина временной выборки, на которой становятся стационарными первые три момента распределения) флуктуаций параметров плазмы. Длина интервалов эргодичности для флуктуаций магнитного поля в первом импульсе нагрева составила 0,2 – 0,25 мс, во втором 0,25 – 0,3 мс, в третьем 0,6 – 0,7 мс. Предполагаются аналогичные величины для флуктуаций плотности. Для разных импульсов нагрева были проанализированы автокорреляционные функции флуктуаций плотности, которые показали существование функций влияния.

В силу близости интервалов эргодичности в таком режиме нагрева возможно объединение данных первого и второго импульсов нагрева для увеличения квазистационарной длины выборки флуктуаций, что позволит проводить R/S анализ и более подробно изучать отличия турбулентных процессов от полностью случайного (гауссовского).

Работа поддержана РФФИ (проект № 18-02-00621)

Список литературы

1. G. M. Batanov, V. D. Borzosekov, D. G. Vasilkov et al. // Plasma Physics Reports, 2019, V. 45, No. 8, pp. 732–740.
2. G.M. Batanov, M.S. Berezhetkii, V.D. Borzosekov et al. // 44th EPS Conference on Plasma Physics, June 26 – 30, 2017, Belfast, Northern Ireland, P2.154.
3. G.M. Batanov, V.D. Borzosekov, N.K. Kharchev et al. // 46th EPS Conference on Plasma Physics, July 8 – 12, 2017, Milan, Italy, P2.1095.
4. Воронова Е.В., Скворцова Н.Н., Малахов Д.В., Хольнов Ю.В. // РАДИОИНФОКОМ-2019, 11 – 15 ноября 2019, Москва, Россия, С. 168.

А.Я.ДЗЮБЛИК¹, Б.Е.ГРИНЮК²

¹*Институт Ядерных Исследований НАН Украины, Киев, Украина*

²*Институт Теоретической Физики им. Н.Н.Боголюбова НАН Украины, Киев*

РОЛЬ ЭЛЕКТРОННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Изучено кулоновское возбуждение ядер свободными электронами в плазме с учетом экранирования поля ядер. Численные расчеты в борновском приближении искаженных волн для ²⁰¹Hg показали, что экранирование приводит к подавлению реакции при низких энергиях и соответственно при относительно низких температурах плазмы. Рассмотрено также влияние электронного экранирования на реакции синтеза при низких энергиях. Проведены расчеты фактора усиления реакции, вызванного экранированием, в адиабатическом приближении и в приближении внезапного возмущения. Кроме того, проделаны вариационные расчеты.

A.YA.DZYUBLIK¹, B.E.GRINYUK²

¹*Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

²*N.N.Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ROLE OF ELECTRONIC SCREENING IN LOW- ENERGY NUCLEAR REACTIONS

The Coulomb excitation of nuclei by free electrons in plasma is studied, taking into account screening of the nuclear field. Numerical calculations in the distorted wave Born approximation for ²⁰¹Hg have shown that screening leads to inhibition of the reaction at low energy and respectively at relatively low temperatures of plasma. An influence of the electronic screening on the low-energy fusion is also considered. The calculations for the reaction enhancement factor, provided by screening, are carried out in the adiabatic and sudden perturbation approximations. Besides, the variation calculations are done.

Изучалось кулоновское возбуждение ядер в плазме свободными электронами, кинетическая энергия которых превышает пороговую энергию возбуждения ядер [1]. Раскладывая волновую функцию падающих электронов по парциальным волнам, мы рассчитали сечение реакции с помощью известных формул Альдера и др. Численные расчеты для ряда ядер показали, что неупругое рассеяние электронов может быть эффективным методом возбуждения ядер, а сечение возбуждения ядер с электрическими мультипольными переходами существенно превышает сечение для ядер с магнитными переходами.

Роль электронного экранирования учитывалась в работе [2]. При этом считалось, что фактор экранирования описывается экспонентой. Для слабо ионизированной плазмы экранирование в основном обусловлено связанными электронами и радиус экранирования почти совпадает с радиусом атома. Опять

при вычислении искаженных волновых функций электронов в экранированном кулоновском потенциале использовалось разложение по парциальным волнам. Радиальные волновые функции разложения $F_l(kr)$ рассчитывались численно. С помощью этих функций находилась зависимость сечения $\sigma_{\text{exc}}(E)$ возбуждения ядра ^{201}Hg от энергии E падающих электронов при нескольких значениях радиуса экранирования. В этом ядре генерируются E2-переходы из основного $3/2^-$ состояния в возбужденный уровень $1/2^-$ с энергией $E_0=1,556$ кэВ. Рассчитана также скорость возбуждения ядер в зависимости от температуры плазмы в интервале от нуля до 10 МК. Считалось, что электроны описываются максвелловским распределением по скоростям. Найдено, что при очень малых значениях радиуса экранирования $\sim 10^{-3}$ нм реакция подавлена практически во всем этом интервале температур. Возможно, такая ситуация реализуется в звездах с большой плотностью.

Нами рассмотрена также реакция низкотемпературного слияния ядер в окружении электронов, которые рассматривались как единая связанная система. Уравнение Шредингера решалось как в адиабатическом приближении, когда скорости атомных электронов значительно превышают относительную скорость ядер, так и в противоположном приближении внезапного возмущения. Сечение реакции, как обычно, записывалось в виде произведения вероятности туннелирования сквозь кулоновский барьер и предэкспоненциального энергетического множителя. Показано, что экранирование влияет только на проницаемость барьера.

Список литературы

1. G.Gosselin, N.Pillet, V.Mèot, P.Morel, A.Ya.Dzyublik, Phys. Rev. C 2009, Vol. 79, 014604. 2. A.Ya.Dzyublik, V.Mèot, G.Gosselin, P.Morel, EPL 2013, Vol. 102, 62001.

И.С. ЕРЕМИН¹, Д.Д. БЕРНТ¹, А.А. ПИСАРЕВ²

¹ООО «Пилкингтон Гласс», дер. Жуково Раменского р-на МО, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЗАХВАТА ВЛАГИ НА ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ КАЧЕСТВА ОКСИДОВ СТАННАТА ЦИНКА В СОСТАВЕ НИЗКОЭМИССИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДАЕМЫХ НА СТЕКЛО ИЗ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

Рассмотрены с использованием VIS/NIR-спектрофотометрии эффекты изменения оптических свойств просветляющих стеков Low-E PVD-покрытий на стекле в видимом диапазоне при абсорбции воды в их внешние диэлектрические ZnSnO_x слои. Проведена оценка обратимости изменения поглощения покрытий в зависимости от длительности их контакта с водой, а также - путем сравнения экспериментальных спектров поглощения с модельным – механизмов, связанных с изменением оптических постоянных слоев покрытия при абсорбции воды.

I.S. EREMIN¹, D.D. BERNT¹, A.A. PISAREV²

¹“Pilkington Glass” LLC, Zhukovo vil., Ramensky distr. of Moscow region, Russia

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

MOISTURE RETENTION INFLUENCE ON THE AR- PROPERTIES OF ZINC STANNATE OXIDES WITHIN THE STACK OF LOW-EMISSIVITY COATINGS DEPOSITED ON GLASS FROM MAGNETRON DISCHARGE PLASMA

The influence on the optical properties of AR Low-E PVD coatings on glass substrates from the water absorption into their outer ZnSnO_x dielectric layers is considered with the use of VIS/NIR-spectrophotometry. The estimations of coatings absorption shift reversibility depending on the initial contact with water duration as well as of the mechanisms responsible for the changes in optical constants of the stack's layers, supported with the comparative analysis of experimental and modeled spectra, are reported.

Антиотражающие (AR - от англ. anti-reflective, также «просветляющие») покрытия широко применяются в настоящее время, в частности, в производстве низкоэмиссионных (Low-E) покрытий на крупноформатном стекле для архитектурного и транспортного остекления. В [1] было показано, как обратимая абсорбция влаги внешним пористым SiO₂ слоем AR-покрытия приводила к заметному увеличению эффективного показателя преломления покрытия и, как следствие, отчетливо разрешимому снижению эффекта просветления. Альтернативным оксиду кремния, также широко использующимся в качестве внешнего диэлектрика Low-E стеков материалом является оксид легированного оловом (станната) цинка - ZnSnO_x. В отношении

него, однако, нет сведений относительно возможности определения факта абсорбции воды, в т.ч. на начальных этапах “отсыревания”, путем VIS/NIR-спектроскопии, а также об обратимости этого процесса.

В рамках экспериментов по выдерживанию в воде образцов Low-E покрытий с просветляющей группой вида «стеклянная подложка – первый диэлектрик спектрального уширения (SiN_x) – серебряный поглотитель - ZnSnO_x » в течение различного времени, выявлено посредством UV/VIS/NIR-спектрофотометрии в пропускании и отражении в диапазоне 250-1000нм, что по итогам первого часа выдержки образцов в воде, наблюдалось уменьшение поглощения покрытия в диапазоне длин волн 350-400нм, наряду с его увеличением в диапазоне 450-750нм и дальнейшим выравниванием к изначальному спектру у ИК-границы. Эллипсометрические измерения показывают, что данный эффект связан, по всей видимости, с непосредственно абсорбцией воды наблюдавшейся на РЭМ пористой поверхностью ZnSnO_x слоя покрытия, приводящей к увеличению эффективного показателя преломления n слоя. Данное предположение подтвердилось моделированием спектральных характеристик покрытий в программном пакете CODE VP, результаты которого соответствуют экспериментальным измерениям. При дальнейшем выдерживании образцов в воде изменение спектра поглощения покрытия, по всей видимости, связано, с диффузией ионов H^+ и OH^- вглубь стека по направлению к серебру и его последующей агрегации. Данные эффекты хорошо известны из литературы [2], и их протекание подтверждается наличием очагов агрегации серебра при ЭДС-анализе образцов.

Обратимость оптических эффектов, вызванных поглощением воды просветляющей группой стеков, оценивалась в ходе спектроскопии образцов, подвергнутых отжигу в муфельной печи при температуре 650 °С в течение 8 минут каждый. Спектры поглощения для образцов с длительностью намокания более 1 часа увеличили свое отклонение от базового спектра в видимом диапазоне длин волн, в то время как для меньших времен выдержки в воде отклонение уменьшилось.

Список литературы

1. K. Nielsen and others// Sci. Rep. 2014. Vol. 6595, № 4, P. 138–44.
2. Ch.-T. Chu and others // Appl. Optics. 2006. Vol. 45, №7, P. 1583-93.

А.А. ИСАЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

УСКОРЕНИЕ НУКЛИДОВ ВОДОРОДА В МАЛОГАБАРИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВАКУУМНЫХ УСТРОЙСТВАХ СО СКРЕЩЕННЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Исследовалось ускорение нуклидов водорода в малогабаритных импульсных вакуумных устройствах со скрещенными электромагнитными полями. Источниками ионов служила лазерная плазма или разряд с полым катодом. Рассмотрены два варианта построения ускоряющей системы. В первом варианте ионы, извлекались из плазмы импульсным электрическим полем с одновременным подавлением паразитической электронной проводимости магнитным полем. Во втором варианте осуществлялось ускорение лазерной плазмы в быстропеременном магнитном поле. Для обоих случаев показана перспективность применения подобных устройств при создании малогабаритных генераторов нейтронов нового поколения.

A.A. ISAEV

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

ACCELERATION OF HYDROGEN NUCLIDES IN SMALL- SIZED PULSED VACUUM DEVICES WITH CROSSED ELECTROMAGNETIC FIELDS FOR NEUTRON GENERATION

The acceleration of hydrogen nuclides in small-sized pulsed vacuum devices with crossed electromagnetic fields was studied. The source of ions was a laser plasma or hollow cathode discharge. Two options for constructing an accelerating system are considered. In the first embodiment, ions were extracted from the plasma by a pulsed electric field with the simultaneous suppression of parasitic electronic conductivity by a magnetic field. In the second variant, laser plasma was accelerated in a rapidly varying magnetic field. For both cases, the prospects of using such devices when creating small-sized neutron generators of a new generation are shown.

В докладе представлены результаты исследований вакуумных импульсных устройств для ускорения дейтронов в скрещенных электромагнитных полях, являющихся логическим продолжением работ начатых ранее сотрудниками НИЯУ МИФИ (Диденко А.Н., Козловский К.И., Цыбин А.С., Шиканов А.Е. и др.) и развивающие предложенные ими идеи [1-3].

Исследования проводились по двум направлениям. Первое направление посвящено усовершенствованию малогабаритных диодных импульсных систем для генерации нейтронов с магнитной изоляцией электронного компонента. В докладе по этой части рассмотрены модели ускорения дейтронов при формировании изолирующего магнитного поля в диодах с использованием

постоянных магнитных элементов и при формировании импульсного изолирующего магнитного поля в диодах с использованием спиральной электродинамической линии. Приводятся результаты экспериментального исследования процессов ускорения дейтронов и генерации нейтронов в разработанных коаксиальных диодах с магнитной изоляцией, использующих лазерную плазму или разряд с полым катодом. Показана перспективность применения предлагаемых технических решений в малогабаритных генераторах нейтронов.

Другое направление было связано с ускорением лазерной плазмы импульсным магнитным полем с продольным градиентом, создаваемым мощным электрическим разрядом на кольцевой или спиральной проводник и возбуждающим в плазме азимутальный ток, взаимодействующий с радиальной составляющей магнитного поля. Рассмотрены модели ускорения нуклидов водорода в таких быстронарастающих магнитных полях. Приводятся результаты экспериментального исследования процессов ускорения нуклидов водорода в магнитных полях, генерируемых указанным образом в малоиндуктивной конической спирали.

Рассмотрены особенности ускорения дейтронов при изменении параметров генератора тока и геометрии спирали. Разработана методика коллекторных измерений скоростей ускоренных ионов. На их основе показана возможность достижения скоростей до 10^6 м/с. Проводится сравнение расчета по предлагаемым моделям ускорения с экспериментом.

Представлены перспективные оценки нейтронного выхода ускорительных нейтронных трубок, использующих рассмотренные схемы ускорения дейтронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 05.605.21.0182 (RFMEFI60519X0182).

Список литературы

1. Didenko A.N., Shikanov A.E., Kozlovskii K.I. et al. Small- size magnetically insulating plasma diodes for neutron generation. Plasma Physics Reports, 40(11), 2014, p.p. 910-918.
2. Bykovskii Y.A., Tsybin A.S., Shikanov A.E. Efficient extraction of hydrogen ions from high-velocity plasma bunches by a pulsed electric field. Russian Physics Journal. 39(4), pp. 347-354.
3. Tsybin A.S., Kuznetsov A.Y., Kozlovsky K.I. Shikanov A.E. New approaches in plasma neutron sources. Applied Physics A. Materials Science and Processing, 74(SUPPL.1), pp. S36-S39.

Г.Г. ДОЛЬНИКОВ, А.А. КАРТАШЕВА, А.С. БЫЧКОВА, И.А.
ШАШКОВА, И. А. КУЗНЕЦОВ, А.Н. ЛЯШ, А. Е. ДУБОВ, В. А.
ГРУШИН, С.А. БЕДНЯКОВ, С.И ПОПЕЛЬ, А.В. ЗАХАРОВ.

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Пылевая плазма на Луне исследуется путем регистрации потоков пылевых частиц вблизи ее поверхности и измерения параметров окружающей плазмы. Прибор PmL, установленный на борт будущей лунных миссий Луна-25 и Луна-27, впервые позволит как детектировать пылевые частицы, так и измерять характеристики плазменной среды. Краткое описание функциональных особенностей этого устройства и результаты калибровочных испытаний представлены в работе. Обсуждаются результаты расчетов зависимости поверхностного потенциала Луны, длины Дебая и напряженности электрического поля от зенитного угла Солнца. Рассмотрено распределение частиц пыли вблизи поверхности Луны на широте места посадки будущих лунных миссий.

G.G. DOLNIKOV, A.A. KARTASHEVA, A.S. BYCHKOVA, I.A.
SHASHKOVA, I.A. KUZNETSOV, A.N. LYASH, A.E. DUBOV, V.A.
GRUSHIN, S.A. BEDNYAKOV, S.I. POPEL, A.V. ZAKHAROV.

Space Research Institute of the Russian academy of Science, Moscow, Russia

MEASURING THE DUSTY PLASMA PARAMETERS NEAR THE LUNAR SURFACE

The dusty plasmas on the Moon are investigating through the direct detection of the dust particle fluxes on the lunar surface and through the measurements of the parameters of ambient plasma. The PmL device is the first device created both to detect dust particles and to determine the characteristics of the plasma environment. A brief description of the functional features of this device mounted on future lunar missions Luna-25 and 27 is presented in the paper. The results of calculations of the dependencies of the lunar surface potential, Debye length and electric field strength on the solar zenith angle are discussed. The distribution of the dust particles near the lunar surface at a latitude close to that of the landing site is considered.

Лунная экзосфера - пример плазменно-пылевой системы в природе. Луна погружена в плазму солнечного ветра и при этом подвергается мощному воздействию солнечного излучения. На освещенной части лунной поверхности фотоэмиссия является доминирующим током, и поверхность приобретает потенциал близкий по значению к энергии фотоэлектронов. Величина потенциала, рассчитанная в [1] на основе теории бесстолкновительного электростатического зонда, составила +10 В. Измерения, впоследствии проведенные с помощью аппарата Apollo Suprathermal Ion Detector [2], подтвердили это значение.

Левитирующие восходящие потоки заряженных пылевых частиц из приповерхностной зоны Луны были обнаружены благодаря снимкам телекамер Surveyor после захода Солнца за лунный горизонт [3]. Современные измерения, проведенные лунной орбитальной миссией Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE), продемонстрировали существование пылевых частиц на высотах от 30 до 110 км [4].

Распределения пылевых частиц и электронов в приповерхностных слоях на освещенной части Луны были рассчитаны в [5] с помощью теории ограниченного орбитального движения. В [6] показано, что высота левитации и предельно допустимые размеры пылевых частиц зависят от циклических изменений ультрафиолетовой части спектра солнечного излучения и параметров солнечного ветра.

Лунная экзосфера является одним из объектов исследования будущих российских лунных миссий: Луна - 25 и Луна - 27. Прибор PmL, созданный как для регистрации частиц пыли, так и для измерения характеристик плазмы окружающей среды, впервые размещен на посадочной платформе лунных аппаратов. В работе представлено краткое описание функциональных особенностей этого прибора и приведены результаты калибровочных испытаний. Проведены результаты исследований параметров пылевой плазмы вблизи места посадки будущих лунных миссий. Поверхностный потенциал Луны был рассчитан для различных значений зенитного угла Солнца на основе теории электростатических зондов. Получены зависимости длины Дебая и напряженности электрического поля от зенитного угла Солнца. Рассмотрено распределение частиц пыли на различных высотах над поверхностью Луны.

Список литературы

1. Manka R. H. // Photon and particle interactions with surfaces in space (Boston: D. Reidel Publishing Company) 1973. P. 347–61.
2. Freeman J. W., Ibrahim M. // Moon 1975. Vol. 14, P. 103–114.
3. Berg O. E., Wolf H., Rhee J. // Space Sci. Rev 2014. Vol. 185, № 1-4, P. 93–113.
4. Horányi M., Sternovsky Z., Lankton M. and others // Space Sci. Rev 2014. Vol. 185, № 1-4, P. 93–113.
5. Popel S. I., Kopnin S. I., Golub` A.P. and others. // Sol.Syst. Res. 2013. Vol. 47, № 6, P. 419–429.
6. Lisin E. A., Tarakanov V. P., Petrov O. F. and others. // JETP lett. 2014. Vol. 98, № 11, P. 664–669.

Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

Изучались свойства приэлектродной плазмы разряда в электролите при использовании электродов из вольфрама и титана. С помощью спектральных исследований была измерена температура плазмы в прикатодной области. Проведено изучение микроструктур на поверхности данных электродов. Для вольфрамовых электродов наблюдаются области с образованием нитевидных структур диаметром 0,3-1,5 мкм. Для титановых электродов регистрируется возникновение участков с микропористой поверхностью при размере пор 0,1-1 мкм.

D.L. KIRKO, A.S. SAVJOLOV

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

RESEARCH OF SURFACE OF ELECTRODES AT ELECTROLYTE DISCHARGE

Properties of near electrode plasma in an electrolyte by tungsten and titan electrodes using were researched. The temperature of plasma in the near cathode region was measured by spectral methods. The research of micro structures on the surface of these electrodes was realized. For tungsten electrodes it is observed regions with the appearance of thread like structures with diameter 0.3-1.5 μm . The origin of parts with a micro pore surface (dimensions 0.1-1 μm) surface was registered for the titan electrodes.

При разрядах в электролитах происходит возникновение свечения вблизи электродов в среде жидкости. Один из электродов в некоторых случаях располагается над поверхностью электролита. Данные разряды могут быть использованы для полировки металлических поверхностей, и для систем очистки воды и воздуха [1-3]. В данных экспериментах использовались камеры цилиндрической формы объемом 100-300 cm^3 и диаметром 7-14 см, изготовленные из оргстекла. Использовались электролиты на основе карбоната натрия и гидроксида натрия. Для катодов применялись стержни из вольфрама, титана и тантала диаметром 1-2 мм, и для анодов - пластины из нержавеющей стали и молибдена. В качестве источника питания использовался двухполупериодный выпрямитель с напряжением 0-240 В при частоте следования импульсов 100 Гц. Катод помещался в керамическую трубку и располагался вертикально в электролите на различной глубине относительно поверхности.

При частоте импульсов 100 Гц, происходит пробой и периодическое зажигание разряда в электролите с данной частотой. Ранее регистрировались

электрические колебания разряда в электролите в следующих частотных диапазонах: 20-300 кГц и 5-80 МГц [4,5]. В случае титанового электрода по линиям атомарного водорода H_{α} и H_{β} методом относительных интенсивностей была рассчитана температура плазмы в прикатодной области разряда, которая составила $T=2800\pm 200$ К при величине тока $I\approx 1,4$ А.

Рассмотрим взаимодействие разряда с поверхностью электродов. Площадь поверхности катода, через которую проходил ток при горении разряда, составляла 0,5-1,5 мм². Для вольфрамового катода исходная вольфрамовая проволока диаметром 1 мм имела волокнистую структуру. Для исследования поверхности электродов были использованы микроскопы VEGA 3 SEM и Hitachi TM1000. Наблюдалась слоистая структура вольфрама и образование нитей диаметром около 0,3-1,5 мкм. Длина данных нитей составляла 100-200 мкм. При более подробном изучении поверхности вблизи трещин были обнаружены области, содержащие нити диаметром около 0,1-1,2 мкм. Возникновение данных нитей, по-видимому, происходит под действием разряда. Вместе с тем на оконечности вольфрамового катода присутствуют участки, содержащие ячеистую структуру с размерами 0,2-1,0 мкм. На поверхности титанового электрода происходит возникновение пористой поверхности с размерами в диапазоне 0,1-1 мкм. Типичная форма отверстий пор овальная. На поверхности также присутствуют трещины неправильной формы с шириной 0,2-0,5 мкм. Ввиду присутствия пористой структуры на поверхности титанового электрода можно предположить, что вблизи поверхности катода происходит филаментация тока разряда на множество отдельных токовых каналов.

Список литературы

1. Гайсин Ал.Ф., Насибуллин Р.Т. // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 10, С. 959-966.
2. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. Свердловск: Издательство Уральского Университета, 1989.
3. Bruggeman P., Leys Ch. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42, P. 053001 (28 pp).
4. Кирко Д.Л. // ЖТФ. 2015. Т. 85, № 4, С. 28-31.
5. Kirko D.L., Savjolov A.S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 941, P. 012018.

Д.В. МАЛАХОВ¹, С.П. КОНЮХОВА², Е.М. КОНЧЕКОВ¹,
Л.В. КОЛИК¹, Н.Н. СКВОРЦОВА^{1,3}

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

²*Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия*

³*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

ГЕНЕРАТОР НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРА

Разработан лабораторный источник низкотемпературной плазмы для биомедицинских применений, основанный на однослойном пьезотрансформаторе. Схемотехника устройства позволяет запоминать режимы работы и управлять энергетическими параметрами разряда за счет регулировки питающего напряжения пьезотрансформатора и скорости протока газа. Оценка дозы воздействия плазменного разряда на объект контролируется косвенными измерениями, за счет ранее определенного энерговклада для различных режимов работы генератора.

D.V. MALAKHOV¹, S.P. KONYUKHOVA², E.M. KONCHEKOV¹,

L.V. KOLIK¹, N.N. SKVORTSOVA^{1,3}

¹*Russia Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov (RNRMU),
Moscow, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia*

³*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia*

LOW-TEMPERATURE PLASMA GENERATOR FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS BASED ON A PIEZOELECTRIC TRANSFORMER

A laboratory source of low-temperature plasma for biomedical applications based on a single-layer piezoelectric transformer has been developed. The circuitry of the device allows you to save operating regimes and control the energy parameters of the discharge by adjusting the supply voltage of the piezotransformer and the gas flow rate. The dose estimate of the effect of a plasma discharge on an object is controlled by indirect measurements, due to a previously determined energy input for various operating regimes of the generator.

Эффективные способы получения холодной плазмы атмосферного давления открывают возможности ее применения в биологии и медицине. Основными факторами её воздействия на биологический объект являются электромагнитное поле, УФ-излучение, заряженные частицы и активные формы кислорода и азота. Определение фундаментальных принципов воздействия на живой организм и

стабилизация режимов работы является одной из важнейших задач для развития данного направления [1,2].

Разработанный источник плазмы базируется на использовании пьезотрансформатора и может работать в трех различных режимах работы за счет сменных ручек (см. рис.1): использование прямого пьезоразряда в воздухе, работу в протоке благородных газов и создание диэлектрического барьерного разряда при работе с диэлектрическим колпачком [3]. Резонансный характер преобразования энергии является важной особенностью, которую необходимо было учитывать при конструировании источника питания. Устройство содержит блок питания с сетевым ЕМИ-фильтром, микроконтроллер управления и сбора данных, задающий генератор прямого синтеза AD9850 (Analog Devices), датчики потока и давления газа, высоковольтный усилитель PA441DF (Arex Microtechnology) и элементы управления.

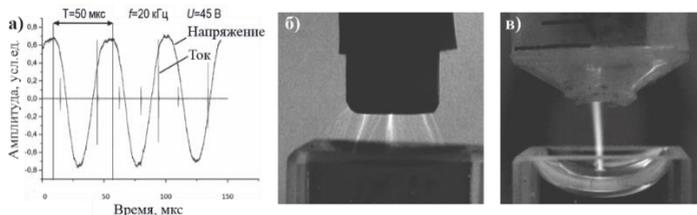


Рис. 1. а) Напряжение на входе пьезотрансформатора и форма наведенного тока на выходе, б) – фотография прямого пьезоразряда в воздушной среде, в) – фотография плазменной струи, образованной при работе с He при малом протоке газа.

Использование современной элементной базы позволило разработать лабораторный многофункциональный генератор низкотемпературной плазмы с регулируемыми параметрами разряда, фиксацией режимов работы и автоматической оценкой дозы воздействия на биологические объекты, за счет ранее определенных энергетических коэффициентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-02-00378 а.

Список литературы

- 1.Reuter S., von Woedtke T., Weltmann K.-D. The kINPen—a review on physics and chemistry of the atmospheric pressure plasma jet and its applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. Vol. 51, № 23. P. 233001.
2. Weltmann K-D et.al. Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine // *Pure Applied Chem.* 2010; 82:1223–37
3. Колик Л.В. et al. Генератор низкотемпературной плазмы. Патент на полезную модель, // RU 181459, 16.07.2018

Е.Д. МАРЕНКОВ¹, А.А. ПШЕНОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²РЦК Курчатовский институт, Москва, Россия

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЛИТИЕВОЙ МИШЕНИ В ПЛАЗМЕ ЛИНЕЙНЫХ УСТАНОВОК

Эффект экранирования моделируется с помощью разработанной нами нульмерной модели. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами. Показано, что коэффициент редепозиции сильно зависит от параметров облучения, что должно учитываться в оценках редепозиции в токамаках.

E.D. MARENKOV¹, A.A. PSHENOV^{1,2}

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

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

LITHIUM TARGET SHIELDING IN PLASMA OF LINEAR DEVICES

Shielding effect is simulated by a 0D model developed earlier. Calculation results agree well with the experimental data. It is shown that the redeposition factor is a strong function of shielding plasma parameters. This has to be taken into account for estimations of redeposition efficiency in tokamaks.

Жидкие металлы рассматриваются как основная альтернатива бериллиево-вольфрамовой стенки, принятой в проекте ITER и в ряде предварительных конструкций DEMO реакторов. При этом основное внимание уделяется литию (Li), олову (Sn) и их сплаву. По сравнению с принятой твердометаллической стенкой, применение жидких металлов позволяет создать непрерывно обновляемую поверхность, защищающую их подложку от экстремального воздействия плазмы.

Разработка конкретной конструкции жидкометаллических элементов, обращенных к плазме, представляет собой сложную технологическую проблему. Для ее решения необходимы тестовые эксперименты, которые удобнее всего осуществлять на линейных плазменных установках, например, Magnum-PSI. На этой установке возможно создание плазмы с параметрами, повторяющими параметры диверторной плазмы токамаков (плотность 10^{20} м⁻³, температура несколько эВ). Соответствующие эксперименты по облучению в гелиевой плазме описаны в работе [1]. Во всех этих экспериментах наблюдается эффект экранирования, состоящий в снижении потока тепла, приходящего на мишень, за счет взаимодействия основной плазмы с эродированным литием. Очевидно, что

эффективность экранирования является принципиальным фактором для проектирования элементов дивертора и первой стенки.

В настоящей работе эффект экранирования моделируется с помощью разработанной нами нульмерной модели, описанной подробно в [2]. Учитываются процессы упругих столкновений между различными сортами частиц, включая перезарядку, рекомбинация, ионизация, соответствующие потери энергии, излучение. Взаимодействие плазмы с поверхностью учитывает эрозию, рециклинг и нейтрализацию на поверхности, с соответствующим выделением энергии. Полученная в результате температура поверхности хорошо совпадают с экспериментальными значениями, наблюдаемыми на Magnum-PSI.

По результатам расчетов были также определены эффективная энергия экранирования и коэффициент редепозиции. Значение энергии, порядка 5 эВ, совпадает с результатами, представленными в [1]. Значение коэффициента редепозиции, однако, существенно отличается: в наших расчетах $R < 0.1$, в то время как в ряде работ на Pilot-PSI и Magnum-PSI приводились значения $R > 0.9$. Мы показываем, что коэффициент редепозиции не является универсальной величиной, а оказывается сильной функцией параметров плазмы, в основном электронной температуры. Принципиальную роль играет отношение длины ионизации атомов лития к поперечному размеру плазмы. Этим и объясняется получающееся противоречие: в упомянутых работах бралась электронная температура, характерная для установки в целом, > 1 эВ, в то время как температура в облаке испаренного материала, по нашим расчетам, оказывается порядка 0.3 эВ. Мы считаем, что этот важный результат должен учитываться при анализе эффективности редепозиции в условиях экранирования в токамаках.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00329.

Список литературы

1. P. Rindt et al 2019 Nucl. Fusion 59 056003
2. E. Marenkov and A. Pshenov 2020 Nucl. Fusion 60 026011

Г.М. БАТАНОВ, В.Д. БОРЗОСЕКОВ, Д.Г. ВАСИЛЬКОВ, И.Ю. ВАФИН,
С.Е. ГРЕБЕНЩИКОВ, И.А. ГРИШИНА, А.А. ЛЕТУНОВ, В.П.
ЛОГВИНЕНКО, А.И. МЕЩЕРЯКОВ, М.Н. ПЕТРОВА, А.А.
ПРОКУДИНА, В.Д. СТЕПАХИН, Н.К. ХАРЧЕВ, Ю.В. ХОЛЬНОВ
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА СТЕЛЛАТОРЕ Л-2М

Представлены результаты исследования удержания высокотемпературной плазмы в квазистационарной трехмерной магнитной конфигурации. Установка Л-2М – классический стелларатор, работающий в режиме безтокового нагрева плазмы с помощью импульсов СВЧ-излучения (электронно-циклотронный резонансный нагрев). В экспериментах использовался импульсно-периодический режим создания и нагрева плазмы методом ЭЦР с различным числом импульсов в пачке, разной длительностью импульсов СВЧ и пауз между ними. Исследованы основные макро- и микропараметры плазменных разрядов.

G.M. BATANOV, V.D. BORZOSEKOV, D.G. VASILKOV, I.Yu.
VAFIN, S.E. GREBENSHCHIKOV, I.A. GRISHINA, A.A. LETUNOV, V.P.
LOGVINENKO, A.I. MESHCHERYAKOV, M.N. PETROVA, A.A.
PROKUDINA, V.D. STEPACHIN, N.K. KHARCHEV, Yu.V. KHOLNOV

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia

EXPERIMENTS WITH THE PULSE-PERIODIC MODE OF ECR HEATING OF PLASMA ON THE L-2M STELLARATOR

The results of the study of high-temperature plasma confinement in a quasi-stationary three-dimensional magnetic configuration are presented. The L-2M device is a classic stellarator operating in the mode of current-free heating of plasma using microwave pulses (electron-cyclotron resonance heating). The experiments used a pulse-periodic mode for creating and heating of plasma using the ECRH method with a different number of pulses in the bundle, different duration of microwave pulses and pauses between them. The main macro- and microparameters of plasma discharges were investigated.

Импульсно-периодический метод нагрева высокотемпературной плазмы, представляющий собой серию повторяющихся СВЧ-импульсов регулируемой длительности, позволяет исследовать переходные процессы в плазме, а также особенности ее свойств на стадиях нагрева и релаксации. Подобный метод, применявшийся ранее на стеллараторе LHD [1], был также использован в серии экспериментов на установке Л-2М, которая представляет собой классический двухзаходный стелларатор с большим радиусом $R = 100$ см, средним радиусом плазмы $a = 11.5$ см и магнитным полем на оси камеры $B_0 = 1 - 1.4$ Т; подробнее в [2]. Эксперименты проводились при условии боронизации стенок вакуумной

камеры, давление плазмы сравнительно мало ($\beta \leq 0.2 \%$). Основным методом создания и нагрева плазмы является ЭЦР-нагрев, также возможно использование омического нагрева (в первую очередь для изменения структуры магнитного поля). Гиротронный комплекс установки состоит из двух гиротронов суммарной мощностью до 1,5 МВт для нагрева на частоте ~ 75 ГГц.

Диагностическая система стелларатора Л-2М включает в себя комбинированную диамагнитную диагностику для измерения энергии плазмы и поглощенной мощности нагрева, исследование радиального распределения электронной температуры в диапазонах рентгеновского, циклотронного и видимого излучений, измерение профилей электронной плотности с помощью микроволнового и лазерного интерферометров, ленгмюровские и магнитные зонды, доплеровскую рефлектометрию, а также систему регистрации рассеяния гиротронного излучения на флуктуациях плотности плазмы.

В работе представлены различные режимы временной модуляции гиротронного излучения, при этом менялась длительность СВЧ-импульсов и пауз в одном плазменном разряде. Мощность гиротрона составляла 300 - 400 кВт, число импульсов СВЧ в пачке варьировалась от 2 до 5, длительность импульсов от 1 до 4 мс, длительность пауз – от 2 до 6 мс. В экспериментах исследовались как макропараметры плазмы, их временная эволюция и пространственное распределение (в первую очередь распределение температуры и плотности по диаметру, а также достигнутая в данной серии экспериментов энергия плазмы.), так и микропараметры – зондовые характеристики пристеночной плазмы, локальные возмущения магнитного поля, характеристики флуктуаций плотности плазмы в различных областях.

Список литературы

1. Itoh K. et al. // Nucl. Fusion. 2017. Vol. 57. 102021.
2. Abrakov V.V. et al. // Nucl. Fusion. 1997. Vol. 37. p.233-239.

**В.В.РАДЕНКО, А.А.ПРИВАЛОВ, А.В.РАДЕНКО,
В.Б.СВИРКОВ, А.В.ГУРСКАЯ**
*ООО ТП «Атомные и субатомные технологии», Самара, Россия
Самарский университет, Самара, Россия
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИОННОГО И ПЛАЗМЕННОГО МНОГОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕННОМ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЕ

Определена математическая модель, описывающая формирование электронно-управляемых ионных пучков. Сформулированы условия стабильности ядерного синтеза. Рассмотрены возможности практического применения разработанной технологии.

**V. V. RODENKO, A. A. PRIVALOV, A. V. RODENKO,
V. B. SVIRKOV, A. V. GURSKAYA**

*Samara POLYTECH, Samara, Russia
Atomic and Subatomic Technologies Platform, Samara, Russia
Samara University, Samara, Russia*

MODELING AND TECHNOLOGY OF ION AND PLASMA MULTIPHASE FLOW IN THE PLASMA ELECTRIC GENERATOR

A mathematical model describing the formation of electronically controlled ion beams is defined. Conditions for the stability of nuclear fusion are formulated. The possibilities of practical application of the developed technology are considered.

Для решения задачи управляемого синтеза легких ядер разработана методика и технология создания и формирования электронно-управляемых ионных потоков в магнитном поле путем группировки потоков посредством дискретизации и задания определенных законов последовательности для ионных потоков [1,2]. Чтобы попасть в область действия ядерных сил в тех случаях, когда используются заряженные частицы или ионы, их кинетической энергии должно быть достаточно для преодоления кулоновского отталкивания ядра. В тех случаях, когда энергия заряженной частицы или иона меньше высоты кулоновского барьера, вероятность ядерной реакции будет стремиться к нулю [3]. Пучки частиц требуемой энергии легко получить в современных ускорителях. Если энергии частицы недостаточно для преодоления кулоновского барьера, она будет испытывать упругое рассеяние в кулоновском поле ядра, описываемое формулой Резерфорда. Для легких ядер, где кулоновский барьер низок, это правило не применяется. Для получения стабильной реакции ядерного синтеза необходимо выполнить ряд условий:

1) суммарная энергия входящей частицы и мишени должна быть выше, чем энергия кулоновского отталкивания;

2) плотность n_i входящего потока и плотность мишени n_m для импульсного режима должны быть равны или выше, чем $n_i = n_m \geq 10^{22} \text{ см}^{-3}$;

3) Время пребывания в магнитооптической камере $\tau \geq 1 \text{ с}$;

4) Энергия ионов во входящем потоке $W_i \geq 200 \text{ кэВ}$.

Генерация плотного потока атомов протонов, дейтерия или трития для синтеза нейтронов на ионно-плазменной мишени дейтерия, трития или лития происходит в результате первичного уплотнения потока и дискретизации по программно-определяемой концентрации и средней энергии потока. Потoki формируются в строго заданных параметрах: t - период последовательности, n – концентрация и частота дискретных потоков ω .

В процессе формирования электронно-управляемых ионных потоков и ядерного синтеза определяются перспективы использования разработанной технологии в различных областях и областях применения, от энергетических установок до электрических авиационных двигателей, в том числе космических. Одним из вариантов является использование этой технологии для нагрева струйного потока CO_2 или азота в нефтяном пласте для получения электрической и тепловой энергии, а также, например, для объемной высокочастотной сушки.

Список литературы

1. Radenko A. V., Radenko V. V., Dolgoplov M. V. // III International Scientific Conference Material Science. Nonequilibrium phase transformations. 2017. 1 (1), p. 107–108.
2. Akimchenko A., Chepurnov V., Dolgoplov M. etc. // EPJ Web of Conferences. - 2017. - Vol. 158.
3. Forrester A.T. // Physics Today. V. 42. 1987.

А.В.ПУЛИШ¹, Д.В. МАЛАХОВ², О.И. МИЛОКОСТ¹, Н.Н.
СКВОРЦОВА^{2,3}, Н.Г. ГУСЕЙН-ЗАДЕ¹

¹*Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И.
Пирогова, Москва, Россия*

²*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

³*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННО- АКТИВИРОВАННОЙ СРЕДЫ НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ КЛЕТОЧНОЙ ЛИНИИ HELA

На основе разработанного генератора низкотемпературной плазмы проведен ряд экспериментов, посвященных исследованию воздействия плазменно-активированных сред (RPMI, деионизированная вода) на выживаемость клеточной линии Hela. Для оценки энерговклада была определена эволюция температуры жидкости в кювете и зафиксированы энергетические характеристики генератора. Оценка выживаемости клеток после воздействия сред с разной степенью активации осуществлялась МТТ тестом.

A. V. PULISH¹, D. V. MALAKHOV^{1,2}, O. I. MILOKOST¹,
N. N. SKVORTSOVA^{2,3}, GOUSSEIN-ZADE¹

¹*Pirogov Russian National Research Medical University (RNRMU), Moscow, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia*

³*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia*

RESEARCH OF IMPACT OF PLASMA-ACTIVATED MEDIUM ON HELA CELL LINE SURVIVAL

Based on developed low-temperature plasma generator, series of experiments was carried out to research effect of plasma-activated media (RPMI, deionized water) on survival of the Hela cell line. To energy valuation, evolution of the liquid temperature in cuvette was determined and energy characteristics of the generator were recorded. Assessment of cell survival after exposure to media with varying degrees of activation was carried out using standard MTT test.

Плазменная медицина является активно развивающимся направлением, связанным с применением плазменных технологий в биомедицинских приложениях. С учетом сложных физико-химических механизмов воздействия низкотемпературной плазмы на биологические объекты и жидкости параметризация разрядов является крайне важным условием успешного развития данного направления [1], [2].

В ходе работы были измерены энергетические параметры разряда и определены временные зависимости напряжения и тока генератора плазмы. В

качестве основы генератора высокого напряжения использовался пьезотрансформатор с резонансной частотой 20кГц, напряжением питания $U_{п}=45$ В и выходным напряжением до 3,5кВ. С помощью инфракрасного матричного датчика измерялось изменение температуры в кювете с жидкостью, облучаемой плазмой, отмечалось её увеличение с 20,7 до 29,4°C за 140 сек. По полученной зависимости была рассчитана базовая доза воздействия низкотемпературной плазмы при неизменных энергетических параметрах генератора на биологический объект, которая равна 51 Дж/мин (см.рис.1).

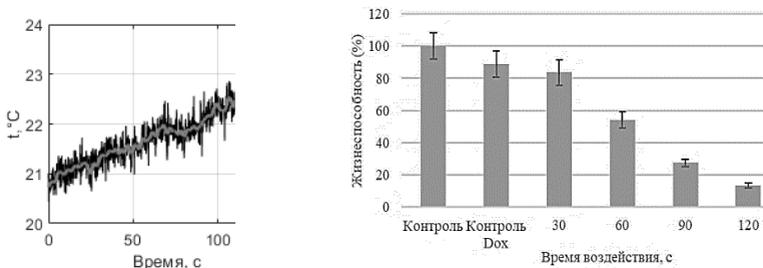


Рис. 1. График зависимости температуры жидкости (слева) и график зависимости жизнеспособности клеточной линии Hela от времени активации жидкости.

С учетом дозы воздействия были подобраны режимы работы источника и проведены эксперименты по воздействию плазменно-активированной среды на клеточную линию Hela. Результаты показали способность облученной среды к статистически значимому подавлению выживаемости опухолевых клеток, до 20% при использовании максимального энергетического режима [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-02-00378 а.

Список литературы

1. Артемьев К.В. и др. Исследование характеристик источника низкотемпературной плазмы на основе пьезотрансформатора // Известия Высших Учебных Заведений. Физика. 2019. Т. 62. N. 11(743). С. 105-111.
2. Weltmann K-D et.al. Atmospheric-pressure plasma sources: pro-spective tools for plasma medicine // Pure Applied Chem. 2010; 82:1223–37
3. Аюнджанов А.Г. и др. Цитотоксическое действие атмосферной холодной плазмы на опухолевые клетки Hela и его изменение в присутствии фармакологических веществ // Биофизика. 2019. Т. 64. N. 6. С. 1134-1137.

А.А. ПШЕНОВ^{1,2}, А.С. КУКУШКИН^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОКНА РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА Т-15

При помощи двумерного транспортного кода SOLPS4.3 проведены расчеты параметров пристеночной плазмы токамака Т-15 для различных уровней вложенной мощности, при которых пиковая тепловая нагрузка на диверторные пластины остается в пределах 10 MW/m^2 , концентрация естественной примеси углерода на сепаратрисе не превышает 2%, а плотность плазмы на сепаратрисе не превышает 50% предела Гринвальда. Показано, что, если мощность, приходящая в пристеночную области, достигает 5 МВт, возникает необходимость работы в режиме детачмента. Полученные в работе профили параметров пристеночной плазмы, соответствующие желаемым режимам работы дивертора, будут использованы для изучения переноса блобов на периферии токамака Т-15.

A.A. PSHENOV^{1,2}, A.S. KUKUSHKIN^{1,2}

¹NRC "Kurchatov institute", Moscow, Russia

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

STUDY OF THE T-15 TOKAMAK DIVERTOR OPERATIONAL WINDOW

Simulations with the 2D transport code SOLPS4.3 are conducted to define the operational window of the T-15 tokamak divertor plasma control parameters, resulting in the peak heat flux to the divertor plates lower than 10 MW/m^2 , the relative concentration of the intrinsic carbon impurity at the separatrix lower than 2%, and the separatrix plasma density below 50% of the Greenwald limit. It is shown that, when the power crossing the separatrix increases to the level of approximately 5 MW, the detached divertor regime becomes mandatory. 2D profiles of the edge plasma parameters for the regimes fulfilling the above requirements will be used to investigate the radial transport of sheath-connected filaments (blobs) in the edge of the T-15 tokamak.

Строящийся на базе НИЦ «Курчатовский институт» токамак Т-15 станет первым крупным российским токамаком, ориентированным на работу с плазмой некруглого сечения в диверторной конфигурации. Экспериментальные наблюдения показывают, что в диверторной конфигурации значительная (до 50 %) часть потока энергии и частиц на поверхность первой стенки переносят сильно вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля плазменные филаменты, так называемые блобы [1], приводя к эрозии компонентов, обращенных к плазме. Таким образом, для определения областей преимущественного взаимодействия блобов и первой стенки токамака Т-15

необходимо изучение динамики филаментов с учетом реальных пространственных неоднородностей распределения параметров пристеночной плазмы установки.

В данной работе при помощи двухмерного транспортного кода SOLPS4.3 [2] было проведено моделирование параметров пристеночной плазмы на начальной стадии работы токамака Т-15 (при относительно небольшой мощности нагрева). Среди полученных равновесий отобраны те из них, которые удовлетворяют следующим условиям: i) пиковая тепловая нагрузка на диверторные пластины q_{pk} не превышает 10 МВт/м², ii) концентрация естественной примеси углерода η_C (возникающей в результате эрозии первой стенки) на сепаратрисе не превышает 2%, iii) плотность плазмы на сепаратрисе не превышает 50% от предела Гринвальда.

Первое и второе условия определяют минимальную плотность пристеночной плазмы, при которой исключено повреждение диверторных пластин в стационарной фазе горения разряда, а поступление продуктов эрозии первой стенки снижено (за счет высокой ионизации в диверторной области) до приемлемого (с точки зрения загрязнения основной плазмы) уровня. Выполнение третьего условия необходимо для обеспечения МГД устойчивости плазменного шнура [3].

Показано, что при вложенных мощностях меньше 5 МВт выбранное ограничение по q_{pk} не достигается, даже в режимах с низкой плотностью плазмы в пристеночном слое, и минимальная плотность в пристеночном слое ограничена лишь требованиями к чистоте основной плазмы. При вложенных мощностях больше 5 МВт, снижение q_{pk} до выбранного предела возможно лишь при работе дивертора в режиме дetchмента.

Фоновые профили параметров пристеночной плазмы для режимов работы дивертора в режимах, удовлетворяющих выбранным критериям, будут использованы для моделирования переноса блобов на периферии токамака Т-15 [4].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-32-00208 мол_а.

Список литературы

1. D'Ippolito D. A. et al. // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18. P. 060501.
2. Kukushkin A.S. et al. // Fusion Eng. Des. 2011. Vol. 86, P. 2865–2873.
3. Eich T., et al. // Nucl. Fusion. 2018. Vol. 58, P. 034001.
4. Учёт граничных условий при создании расчётных сеток для моделирования динамики блобов в трёхмерном коде VOUT++ / Ляшенко А.Б. [и др.] // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз, материалы конф., 11-14 февраля г. Москва, 2020.

А.А.ДРОЗДОВСКИЙ¹, П.В.САСОРОВ², А.В.БОГДАНОВ¹,
Р.О.ГАВРИЛИН¹, С.А.ДРОЗДОВСКИЙ¹, А.В.КАНЦЫРЕВ¹, М.А.
КАРПОВ³, В.А.ПАНЮШКИН¹, И.В.РУДСКОЙ¹, С.М.САВИН¹

¹НИИЦ «Курчатовский Институт» - ИТЭФ, Москва, Россия

²Институт прикладной математики РАН, Москва, Россия

³ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ Z-ПИНЧА С ИНИЦИАЦИЕЙ РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Проведено изучение развития разряда в плазме, инициированного пучком электронов с энергией 250 кэВ при токе до 100 А и длительностью около 100 нс. Получены радиальные распределения плотности эмиссии излучения плазмы в различные моменты времени после начала разряда для разных начальных давлений аргона и кислорода в диапазоне 0.1÷5 мбар. Сравнение с экспериментами без электронного пучка показало наличие существенных различий в процессах развития разряда, особенно на этапе пинчевания.

А.А. DROZDOVSKY¹, P.V. SASOROV², A.V. BOGDANOV¹, R.O.
GAVRILIN¹, S.A. DROZDOVSKY¹, A.V. KANTSYREV¹, M.A. KARPOV³,
V.A. PANYUSHKIN¹, I.V. ROUDSKOY¹, S.M. SAVIN¹

¹NRC «Kurchatov Institute» - ITEP, Moscow, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

³FSUE Russian Federal Nuclear Center - VNIIEF, Sarov, Russia

A STUDY OF Z-PINCH DISCHARGES INITIATED BY AN ELECTRON BEAM

Plasma discharge initiated by the electron beam with an energy of 250 keV, a current up to 100A and a pulse duration of 100ns was studied. The radial distributions of the density of the emission of plasma radiation are obtained at different times after the start of the discharge for different initial pressures of argon and oxygen in the range of 0.1÷5 mbar. Comparison with experiments without an electron beam showed the significant differences in the processes of discharge development, especially at the pinching stage.

Исследование процессов пробоя, развития разряда и образования Z-пинча является важнейшим направлением плазменных исследований. Обычно процесс разряда в газе начинается с пробоя по поверхности разрядной трубки после подачи на неё высокого напряжения. Но возможна инициация разряда и иным способом. В течение ряда лет в ИТЭФ проводится изучение разряда, инициированного пучком электронов, инжектированных вдоль оси разрядной трубки [1]. Для этого используется экспериментальная установка, включающая источник электронного пучка с энергией 250 кэВ при токе до 100 А и длительностью до 100 нс. Проводимые эксперименты направлены на более

полное исследование физики сжатия плазмы в z-пинчах, а также улучшение понимания динамики распределения разрядного тока при различных условиях формирования разряда. В дополнение к обычно применяемой методике регистрации излучения разрядной плазмы в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне в настоящее время освоена методика регистрации излучения плазмы в области вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений. Это существенно расширило энергетический диапазон исследований и позволило получить радиальные распределения плотности эмиссии излучения плазмы в различные моменты времени после начала разряда для разных давлений аргона и кислорода в диапазоне $0.1 \div 5$ мбар.

Проведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами экспериментов без электронного пучка (рис.1).

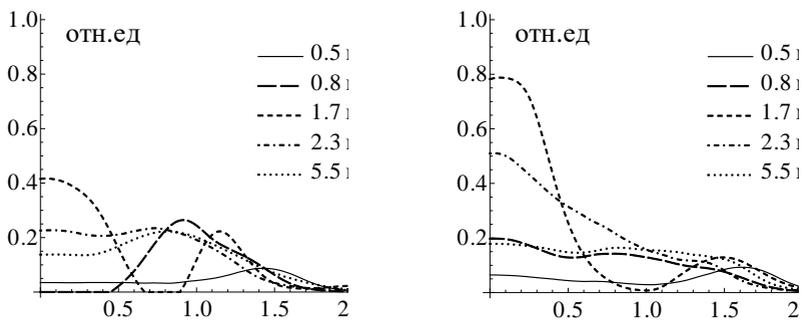


Рис.1. Радиальное распределение плотности эмиссии в разные моменты времени после начала разряда в кислороде: без пучка (слева) и с пучком (справа).

Он показал существенные различия процессов развития разряда, особенно на стадии пинчевания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-02-01187

Список литературы

1. A.A.Drozdzovsky, A.V.Bogdanov, R.O.Gavrilin, A.A.Golubev, S.A.Drozdzovsky, I.V. Roudskoy, S.M.Savin, V.V.Yanenko. Installation for Studying the Plasma of Z-Pinch Initiated by an Electron Beam, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016, Vol. 13, No. 7, pp. 816–821

В.В.РАДЕНКО, А.В.РАДЕНКО, В.Б.СВИРКОВ, А.В.ГУРСКАЯ

*ООО ТП «Атомные и субатомные технологии», Самара, Россия
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия*

РАЗРАБОТКА ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ К

В данной работе рассмотрены технологические параметры ионно-плазменного двигателя, требуемые энергетические характеристики которого достигаются инъекцией продуктов термоядерного синтеза в магнитодинамическую камеру и последующим взаимодействием с плазмой двигателя.

V.V. RADENKO, A.V. RADENKO, V.B. SVIRKOV,
A.V. GURSKAYA

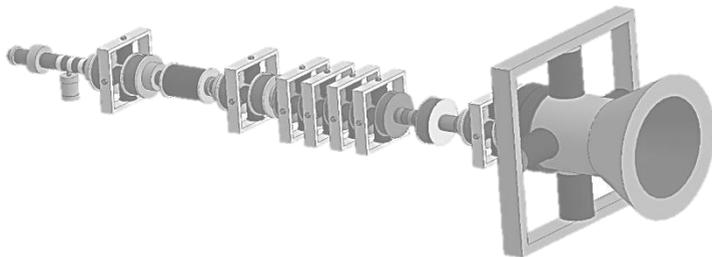
*Atomic and Subatomic Technologies Platform, Samara, Russia
Samara POLYTECH, Samara, Russia*

DEVELOPMENT OF K-SERIES PLASMA ELECTRIC MAGNETODYNAMIC JET ENGINES

In this paper we consider the technological parameters of an ion-plasma engine, the required energy characteristics of which are achieved by injection of fusion products into the magnetodynamic chamber and subsequent interaction with the plasma of the engine.

Плазменные электрические магнитодинамические реактивные двигатели PEMRD-1KM –XX V1.0 серии К (космические) предназначены для использования в качестве маршевых двигателей на специально спроектированных космических летательных аппаратах. Исследование таких двигателей актуально в связи с развитием космической программы запуска спутников.

В работе рассмотрены технические характеристики плазменных реактивных двигателей серии К для различных режимов работы. Работа двигателя и



двигательных генераторов основана на преобразовании реакции высокотемпературного горения лития и водорода (водород, дейтерий, тритий) и преобразовании выделяющегося тепла в ходе много-циклового электронно-управляемого термоядерного синтеза в электрическую энергию, тепловую энергию и последующее преобразование в реактивную тягу.

отемпературного горения лития и водорода (водород, дейтерий, тритий) и преобразовании выделяющегося тепла в ходе много-циклового электронно-управляемого термоядерного синтеза в электрическую энергию, тепловую энергию и последующее преобразование в реактивную тягу.

Рис.1. Основные элементы плазменного реактивного двигателя.

Список литературы

1. Radenko A. V., Radenko V. V., Dolgoplov M. V. // III International Scientific Conference Material Science. Nonequilibrium phase transformations. 2017. 1 (1). p. 107–108.
2. Akimchenko A., Chepurnov V., Dolgoplov M. etc. // EPJ Web of Conferences. - 2017. - Vol. 158.
3. Forrester A.T. // Physics Today. V. 42. 1987.

Н.Н. СКВОРЦОВА^{1,2}, С.А.МАЙОРОВ¹, Д.В. МАЛАХОВ¹,
В.Д. СТЕПАХИН¹, Е.А. ОБРАЗЦОВА², О.Н. ШИШИЛОВ³

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

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

³*Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий
им. М.В. Ломоносова (МИРЭА), Москва, Россия*

ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ НАД ПОРОШКОМ РЕГОЛИТА ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА

Приведены результаты исследования пылевых структур, возникающих при развитии цепных плазмохимических процессов, инициируемых импульсным излучением гиротрона в смесях порошков. Химический состав смеси порошков соответствует лунному реголиту. Рассматривается аналогия возможного вклада кулоновского расталкивания заряженных частиц и плазменных экзотермических процессов разлета пыли, как при подъеме частиц реголита при бомбардировке микрометеоритами поверхности Луны.

N.N. SKVORTSOVA^{1,2}, S.A. MAYOROV¹, D.V. MALAKHOV¹,
V.D. STEPACHIN¹, E.A. OBRAZTSOVA², O.N. SHISHILOV³

¹*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia*

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

³*Russian Technology University, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies
(MIREA), Moscow, Russia*

DUSTY STRUCTURES AND CHAIN REACTIONS INITIATED IN REGOLITH BY PULSED RADIATION OF THE GYROTRON

The results of studying dust structures arising from the development of chain plasma-chemical processes initiated by pulsed radiation of a gyrotron in powder mixtures are presented. The composition of the powder mixture corresponds to lunar regolith. An analogy of the possible contribution of the Coulomb repulsion of charged particles and plasma exothermic processes to the expansion of charged particles to regolith dust on Moon during the micrometeorite bombardment of the lunar surface is considered.

Ранее плазменно-пылевые заряженные микрочастицы были обнаружены над поверхностью смесей металлических и диэлектрических порошков в разрядах, инициированных излучением гиротрона большой мощности [1]. В этих экспериментах импульсное микроволновое излучение (мощность 100-300 кВт, частотой 75 ГГц) подавалось на смесь порошков, помещенных на кварцевую пластину в плазмохимическом реакторе с открытой верхней границей. В настоящих экспериментах использовали смесь оксидных порошков с процентным химическим составом, таким же, как в реголите Луны. Эксперименты по исследованию пылевой плазмы проводились с реголитом на специальном плазмохимическом стенде с оригинальным реактором,

включенным в стандартную конструкцию гиротронного комплекса МИГ-3. Превышение порога цепных реакций (энергия импульса гиротрона 1...3 кДж при длительности импульса 1,5...4 мс) инициирует взрывной процесс, вызванный кулоновским отталкиванием заряженных частиц с поверхности смеси порошков в объем плазмохимического реактора. В результате создаются левитирующие ансамбли заряженных частиц, распределение по размерам и химический состав которых соответствует лунному реголиту [2]. Указано на аналогии физических и химических процессов в данном эксперименте (микроволновой пробой, кулоновское расталкивание заряженных частиц, экзотермических самоподдерживающихся реакций) и процессов возникновения лунной пыли, развитие которых может произойти в лунном реголите при бомбардировке микрометеоритами ее поверхности.

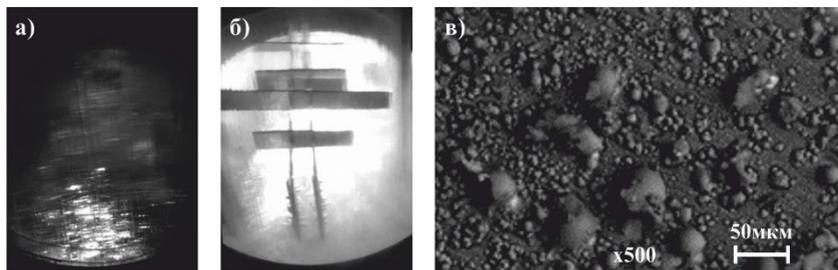


Рис.1. а) – облако заряженных частиц в реакторе. б) – пластины для испытаний. в) – поверхность нержавеющей стали с осажденными частицами реголита.

На рис.1а показано левитирующее облако заряженных частиц, которое заполняет объем плазмохимического реактора. Это облако было использовано в имитационных экспериментах по модификации поверхности материалов. На рис.1б показана установка металлических пластин в реакторе (на фоне горячей поверхности порошка). На рис. 1в приведена фотография (электронная микроскопия) модифицированной поверхности нержавеющей стали с осажденными частицами реголита (масштаб 50 мкм).

Работа выполнена при поддержке гранта МК-1995.2019.2.

Список литературы

1. Н.Н. Скворцова, Д.В. Малахов, В.Д. Степахин, С.А. Майоров и др. // Инициация пылевых структур в цепных реакциях под воздействием излучения гиротрона на смесь порошков металла и диэлектрика с открытой границей. Письма в ЖЭТФ, 2017, Т.106, 240 – 246.

2. Н.Н. Скворцова, С.А. Майоров, Д.В. Малахов, В.Д. Степахин и др. // О пылевых структурах и цепных реакциях, возникающих над реголитом при воздействии излучения гиротрона. Письма в ЖЭТФ, 2019, Т. 109, 452 – 459.

Д.С. СТЕПАНОВ, А.П. СКРИПНИК, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ЭМИТТЕРА ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ЛЕГКИХ ИОНОВ ПЕННИНГА НА ИЗВЛЕКАЕМЫЙ ТОК

Рассмотрено влияние величины тока электронного эмиттера и его конфигурации на параметры импульса извлекаемого из источника легких ионов Пеннинга ионного тока. Показано, что лучшей для достижения этих параметров является трубчатая форма эмиттера электронов. Даны зависимости параметров импульса извлекаемого ионного тока от радиуса кольца и величины электронного тока.

D.S. STEPANOV, A.P. SKRIPNIK, E.Y. SHKOLNIKOV

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

INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE ELECTRONIC EMITTER OF THE PULSED LIGHT ION SOURCE PENNING ON THE EXTRACTED CURRENT

The influence of the current value of the electron emitter and its geometry in a pulsed source of light Penning ions on the pulse parameters of the extracted ion current is considered. It is shown that the tubular configuration of the electron emitter is the best for rapid increase and larger ion current. The dependences of the pulse parameters of the extracted ion current on the radius of the ring and the electron current value are given.

Для использования в нейтронном каротаже требуются газонаполненные нейтронные трубки (ГНТ), способные генерировать нейтронные импульсы с короткими фронтами [1]. Их параметры зависят от формы импульсов ионного тока, которые исследуются в этой работе.

Исследуемая модель ионного источника цилиндрической формы, радиусом 1 см и длиной 1,6 см, представляет собой источник Пеннинга с аксиальным магнитным полем, величиной до 0,2 Тл. Электроды источника включают в себя анод, на который подаётся импульс с амплитудой +2,5 кВ и временем нарастания 0,5 мкс, эквивалентный извлекающий электрод, создающий такое же поле, как и вся ионно-оптическая система, и находящийся под напряжением -2,5 кВ, а также катод и антикатод с нулевым потенциалом. Моделирование проводилось РiС-методом с помощью кода KARAT. Получена зависимость величины ионного тока от времени для значений инжектируемого электронного тока в диапазоне от 1 мА до 50 мА. Определён установившийся ионный ток I_m , и выявлена его независимость от величины инжектируемого тока (Рис. 1а). Рассмотрена величина ионного тока ($I_{0,5}$) в конце фронта импульса напряжения

на аноде, соответствующая завершению быстрого роста тока ионов и время достижения стационарного состояния τ_m . При замене сплошного эмиттера на кольцевой, при сохранении тока электронов, ионный ток I_m увеличился с 1,4 до 1,7 мА. Установившийся ток и ток $I_{0,5}$ растут при увеличении внутреннего радиуса кольцевого эмиттера (с сохранением его площади), но после определённого момента происходит их резкий спад (Рис. 1б).

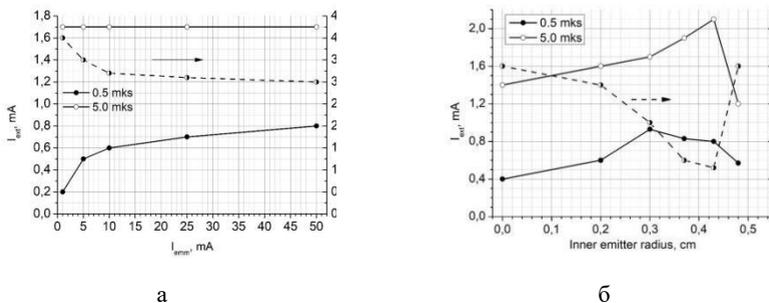


Рис. 1. Графики величин $I_{0,5}$, I_m , τ_m от тока инжекции (а) и радиуса эмиттера (б).

Отсутствие роста ионного тока при увеличении электронного тока вызвано снижением потенциала, из-за чего, инжектируемые электроны не набирают достаточную для ионизации газа энергию. Ионный ток в кольцевой геометрии эмиттера увеличивается, из-за наличия на оси системы положительного объёмного заряда, доускоряющего большую часть ионов в сторону извлекающего отверстия. С увеличением радиуса эмиттера, область ионизации приближается к аноду, где напряжённость электрического поля выше, растёт доля электронов, способных ионизовать газ, и ионный ток увеличивается. При этом часть электронов падает на анод, из-за чего ионов образуется меньше. Значит, существует оптимальное положение эмиттера, дающее наибольший ионный ток.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 05.605.21.0182 (RFMEFI60519X0182).

Список литературы

1. Битулев А.А., Курдюмов И.Г., Чурин 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.

Н.А. СМОЛАНОВ

*Национальный исследовательский университет «МГУ имени Н.П.Огарева», Саранск,
Россия*

ФРАКТАЛЫ ИЗ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА: ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА

Токовые слои в катодном пятне вакуумной дуги - причина образования фрактальных агрегатов. Диссипация энергии магнитного поля токовых слоев приводит к созданию плазменной микронеустойчивости. Этот процесс - (дрейфово-диссипативная неустойчивость), в котором может происходить образование фракталоподобных агрегатов из-за неустойчивости фронта роста.

N.A. SMOLANOV

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

ARC PLASMA FRACTALS: PRODUCTION AND PROPERTIES

Current layers in the cathode spot of the vacuum arc cause the formation of fractal aggregates. The dissipation of the energy of the magnetic field of the current sheets leads to the creation of plasma micro-instability. In this process (drift-dissipative instability), the formation of fractal-like aggregates may occur due to instability of the growth front.

Термин «пылевая плазма» применяется и в космосе, и в лабораторной низкотемпературной разряженной плазме. В начале 90-х годов прошлого столетия в промышленных установках плазменного травления были обнаружены структуры, похожие на плазменно-пылевые [1]. Возникло новое направление в изучении процессов в плазме – плазмохимия [2]. Образование конденсированного вещества при этом рассматривается не как простое взаимодействие атомов или молекул, а «слипание» (конгломерация) частиц плазмы в возбужденном (активированном) состоянии, что приводит к образованию фрактальных агрегатов нанометровых размеров.

Вопросы, связанные с рождением и гибелью плазмы на стенках, остаются актуальными. Изучение физических процессов, происходящих в плазме дугового разряда, часто ограничено развитием методов исследования. Особенно недостаточно работ по исследованию продуктов этих процессов в различных лабораторных условиях, в том числе и условия УТС, где, как известно, возникают фрактальные агрегаты, похожие по морфологии поверхности и свойствам на структуры из дугового разряда.

Анализ взаимодействия пылевых частиц на расстояниях больше дебаевского радиуса, проведенный в работе [1], привел к выводу о новых механизмах взаимодействия, ведущих к образованию фрактальных структур. Был предложен

простой и наглядный механизм роста частиц в плазме на начальном этапе: рекомбинация электронов и ионов на пылинках, которая приводит к постоянному росту (депозиции) материала. Дальнейший рост пылевых частиц приводит к образованию фрактальных структур, механизм агломерации которых до сих пор плохо понятен.

В настоящей работе предлагается гипотеза формирования фрактальных агрегатов, основанная на наиболее известных моделях катодных пятен - электронно-магнитная модель [3] и модель плазменного канала [4]. В них, вероятно, впервые была высказана идея существования токового слоя в плазме дугового разряда и установлен эффект повышения ионного заряда при наложении внешнего магнитного поля $> 0, 01$ Т. Переход от сферического расширения плазмы к продольному движению вдоль поля приводит к возникновению плазменного канала [4], диаметр которого уменьшается с ростом поля.

В настоящей работе установлены возможные причины и место формирования дисперсных фрактальных частиц. Образование фракталоподобных агрегатов происходит в условиях неустойчивости фронта роста [5], возникающий в токовых слоях [6]. Проведен анализ роста фракталов, сопровождающийся высокими скоростями диссипации энергии. Обсуждаются возможные процессы в плазменном потоке вакуумной дуги с участием токовых слоев, один из которых приводит к образованию фракталов [7].

Список литературы

1. Цытович В.Н., Винтер Дж., УФН, 1998, том 168, №8, с. 899-907.
2. Низкотемпературная плазма, Т.3. Химия плазмы, под ред. Л.С. Полака и Ю.А. Лебедева, Новосибирск, Наука, 1991, 328 с.
3. Андреев А.А.// Известия Харьковского университета, 2007, №763, С. 32-39.
4. Криинберг И.А.Письма в ЖТФ, 2003, том 29, вып.12, стр. 42-48.
5. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots... Berkeley: Springer Science, 2008.
6. Бакунин О. Г. // УФН. 2018. Т. 188. С. 55.
7. Смоланов Н. А. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 29.

**А.С. СОКОЛОВ, Д.В. МАЛАХОВ, В.Д. СТЕПАХИН,
Н.Н. СКВОРЦОВА**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ГИРОТРОНОМ

Описан аппаратный комплекс, состоящий из микроволновых, видео и оптических диагностик. Комплекс использован в гиротронном плазмохимическом стенде для измерения параметров процессов, развивающихся при синтезе и напылении веществ.

**A.S. SOKOLOV, D.V. MALAKHOV, V.D. STEPACHIN, N.N.
SKVORTSOVA**

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia*

HARDWARE COMPLEX OF REGISTRATION PARAMETERS OF PLASMA-CHEMICAL PROCESSES INITIATED BY GYROTRON

The hardware diagnostic system consisting of microwave, video and optical diagnostics is described. This complex is used for plasma-chemical applications for measuring the parameters of processes during the synthesis and deposition of substances.

В ИОФ РАН был разработан новый метод синтеза веществ микро- и наноразмеров, основанный на развитии цепных плазмохимических процессах, инициированных импульсным излучением гиротрона [1]. Чтобы определить необходимые условия для синтеза композитов и создания покрытий, необходим контроль параметров СВЧ пробоя и развития физико-химических процессов. С этой целью, в волновой плазмохимический стенд был интегрирован диагностический комплекс, который позволил измерять эволюцию во времени различных характеристик волнового технологического процесса: микроволнового плазменного разряда и эволюции синтеза/осаждения веществ. На рис.1 представлена схема диагностического комплекса плазмохимического стенда. В комплекс входят балансные энергетические, оптические и видео диагностики.

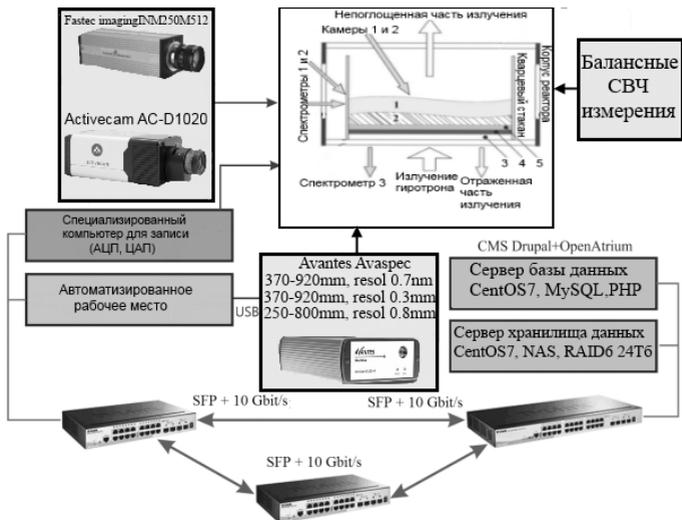


Рис. 1. Аппаратно-программный диагностический комплекс плазмохимического стенда.

В результате создания аппаратно-программного комплекса появилась возможность описания микроволновых (поглощение микроволн в порошке, коэффициент полезного действия), плазменных (температура плазмы, состав пламенной смеси, заряд частиц пылевой плазмы и др.) и физико-химических (длительность горения, анализ молекулярных спектров и др.) параметров волновых процессов для различных задач. Разработанный комплекс был протестирован в экспериментах по синтезу и осаждению гексагонального нитрида бора, модификации поверхностей (кварца, молибдена, стали) и экспериментах с реголитом [2].

Работа выполнена при поддержке гранта МК-1995.2019.2

Список литературы

1. Скворцова Н.Н., Ахмадуллина, Соколов А.С., Степахин В.Д., и др. // Синтез микро- и наноструктур в ценных плазмохимических реакциях, инициируемых микроволновым излучением гиротрона в смесях порошков металла и диэлектрика, XV Школа по плазмохимии для молодых учёных России и стран СНГ, Иваново, 10 – 15 сентября 2018 г.

2. N.S. Akhmadullina, N.N. Skvortsova, E.A. Obratsova, V.D. Stepakhin et al. Plasma-chemical processes under high-power gyrotron's discharge in the mixtures of metal and dielectric powders *Chemical Physics*, 2019, Vol. 516, pp. 63–70.

А.А. СТЕПАНЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПЛАЗМЫ И СКИН-ЭФФЕКТА НА ДИНАМИКУ БЛОБОВ НА ПЕРИФЕРИИ ТОКАМАКА

Рассмотрено совместное влияние пространственных неоднородностей распределения температуры плазмы и частичной вмороженности магнитного поля (скин-эффекта) в плазму блобов на характер их распространения в пристеночной области токамака. Найдены выражения для распределения потенциала и токов внутри филаментов. Получены оценки для скорости движения блобов на периферии установки. Результаты качественного анализа динамики блобов проиллюстрированы численными расчетами движения филаментов в коде BOUT++.

A.A. STEPANENKO

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

SYNERGISTIC EFFECT OF PLASMA TEMPERATURE INHOMOGENEITIES AND SKIN-EFFECT ON BLOB DYNAMICS IN TOKAMAK EDGE

The synergistic effect of temperature inhomogeneities of plasma and skin-effect on dynamics of blobs in the tokamak edge is considered. Expressions for the distributions of the electrostatic potential and currents in a blob are derived. Estimates for the blob propagation velocity are found. The analytical results are supplemented with the results of numerical simulations of blob dynamics in the BOUT++ code.

Турбулентный конвективный перенос вещества и энергии тонкими токовыми филаментами, сильно вытянутыми вдоль направления линий магнитного поля, или блобами, является одним из универсальных механизмов переноса плазмы на периферии установок с магнитным удержанием плазмы, таких как стеллараторы или токамаки [1, 2]. Экспериментальные наблюдения [2] показывают, что блобы могут переносить до половины от общего потока частиц и тепла, идущих на первую стенку токамаков, что в совокупности с требованием минимизации эрозии обращенных к плазме материалов делает анализ параметров и характера движения блобов на периферии установок важной задачей.

Необходимость точного описания динамики филаментов в пристеночной области токамаков в настоящее время привела к тому, что для описания переноса блобов широко используются методы компьютерного моделирования. Расчетные коды, применяемые для этих целей (например, коды GBS, HESEL и другие [3]), основаны на использовании тех или иных форм дрейфово-редуцированных уравнений двухжидкостной магнитной гидродинамики

(уравнений Брагинского). При этом для описания динамики пристеночной плазмы используется, как правило, электростатическое приближение, подразумевающее отсутствие возбуждения электромагнитных полей на периферии установок.

В работах [4, 5] было продемонстрировано, что использование электростатического приближения не всегда оправдано при описании динамики блобов в пристеночной области токамака. При этом главным фактором, оказывающим влияние на движение филаментов, оказывается частичная вмороженность магнитного поля в плазму (скин-эффект).

Нужно отметить, что при анализе параметров динамики блобов в [4, 5] в качестве модельного было принято предположение о том, что пристеночная плазма характеризуется пространственно однородным распределением температуры, что, строго говоря, не соответствует картине экспериментальных наблюдений [2]. В настоящей работе указанное ограничение снято, при этом рассматривается одновременное влияние пространственной неоднородности распределения температуры плазмы и скин-эффекта на характер движения филаментов в пристеночной области токамака. Представлена система уравнений динамики блобов, включающая, помимо основного набора уравнений [5], эволюционное уравнение для температуры электронов плазмы. При анализе динамики филаментов учтено, что блок может характеризоваться неоднородностью распределения температуры как поперек, так и вдоль силовых линий магнитного поля. Получены выражения для распределений потенциала и токов внутри филаментов. На их основе найдены выражения для оценок скорости движения блобов на периферии установки. Результаты качественного анализа подкреплены количественными расчётами динамики блобов в турбулентном коде BOUT++ [6].

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

Список литературы

1. Krashennnikov S. I., D'Ippolito D. A., and Myra J. R. // J. Plasma Phys. 2008. Vol. 74. P. 679.
2. D'Ippolito D. A., Myra J. R., and Zweben S. J. // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18. P. 060501.
3. Riva F., et al. // Plasma Phys. Contr. Fusion. 2016. Vol. 58. №. 4. P. 044005.
4. Stepanenko A. A., Lee W., and Krashennnikov S. I. // Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 012301.
5. Stepanenko A. A. // Proc. V Conference LaPlas 2019. 2019. Vol. 2. PP. 38–39.
6. Dudson B. D., Umansky M. V., Xu X. Q., et al. // Comp. Phys. Comm. 2009. Vol. 180. P. 1467.

Д.С. СТЕПАНОВ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ В СВЧ РАЗРЯДЕ В РЕЖИМЕ ЭЦР

Рассмотрен алгоритм решения кинетического уравнения Больцмана для электронов СВЧ разряда в режиме электронно-циклотронного резонанса. Разработанные механизмы регулирования области определения функции распределения электронов по ходу решения позволяют моделировать эволюцию функции распределения не только при ее релаксации, но и при нагреве, а также учитывать упругие и неупругие кинетические процессы.

D.S. STEPANOV, E.Y. SHKOLNIKOV

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

ALGORITHM DEVELOPMENT FOR AN EVOLUTION MODELING OF ELECTRON ENERGY DISTRIBUTION FUNCTION IN MICROWAVE DISCHARGE IN ECR MODE

Algorithm for solving the Boltzmann kinetic equation for electrons of microwave discharge in the electron-cyclotron resonance mode is considered. The mechanisms developed for regulating the domain of the electron distribution function along the solution make it possible to simulate the evolution of the distribution function not only during its relaxation, but also during heating, and also to take into account elastic and inelastic kinetic processes.

Определение динамики протекания кинетических процессов в плазме газового разряда является сильным инструментом при разработке различных плазменных приборов, таких как ионные источники, газоразрядные лазеры, и пр. Для этого могут использоваться математические модели различной сложности, включающие в себя те или иные приближения, выбор между которыми зависит от условий каждой конкретной задачи. Существующие в настоящий момент модели не учитывают одновременно процессов нагрева заряженных частиц электромагнитными полями, передачи энергии между компонентами плазмы, а также их превращения, что не позволяет в полной мере исследовать переходные процессы в плазме газового разряда [1 – 3].

Численное решение системы уравнений осуществляется неявным методом Адамса-Мултона с переменным шагом и порядком интегрирования, реализованным в коде Fortran. Интегрированию подвергается система из $NF + NC + NC - 1$ уравнений, где NF — число точек, на которые разбита функция распределения (ФР) электронов, NC — число компонент разряда (уравнений на их концентрации), а $NC - 1$ — число уравнений на величины средней энергии

тяжелых компонент. Присутствие в задаче нагрева электронов и их упругих соударений между собой приводит к изменению размеров области определения ФР. В этой связи, должен быть присутствовать механизм изменения ее границ, что при неизменной величине NF означает управление начальным значением энергии E_0 и шагом между точками в которых рассчитывается ФР. Эти новые значения существенно влияют на величину шага интегрирования, т.к. он определяется своим минимумом среди всех уравнений системы. Чем больше различие между значениями ФР и ее производной, тем сильнее шаг интегрирования по времени не соответствует большей части решаемых уравнений, а общая скорость решения задачи уменьшается. Отсюда следует определение регулирующего областью определения ФР условия как удовлетворение заданной кратности отношения между максимальным и минимальным значениями ФР и ее производной соответственно K_f и $K_{f'}$. Данные величины определяют полноту моделирования эволюции ФР и от них зависит как, с одной стороны, точность решения кинетического уравнения, так и с другой стороны, затрачиваемое на это время, а вместе с ним и возможность осуществления решения как такового. Так, например, при значениях K_f и $K_{f'}$ равных 10, СВЧ разряд с начальной концентрацией молекулярного дейтерия равной 10^{13} см⁻³, напряженностью СВЧ поля 10^4 В/м и частоте 2.45 ГГц, индукцией магнитного поля 815 Гс моделируется до полного расхода первоначального дейтерия за 62 часа (88 мкс) на 14 потоках процессора Intel Core i7 с частотой 3.6 ГГц, а ошибка не превосходит 5%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90033.

Список литературы

1. Shakhmatov V.A., Lebedev Y.A., Lacoste A., Bechu S. The role of secondary processes in kinetics of triplet states of a hydrogen molecule in an ECR discharge. Journal of Physics: Conference Series. 2017, Vol. 927, issue 1, 012052.
2. Сторожев Д.А. Численное моделирование кинетики ионизации и диссоциации водорода в плазме разряда Пеннинга в приближении ЛТР. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014, Т. 15, № 3, 229.
3. Capitelli M. and Colonna G. and Pietanza L.D. and D'Ammando G. Coupling of radiation, excited states and electron energy distribution function in non-equilibrium hydrogen plasmas. Spectrochimica Acta part B, 2013, Vol. 83, p. 1 – 13.

Е.Д. КАЗАКОВ^{1,2}, Ю. Г. КАЛИНИН¹, Д.И. КРУТИКОВ¹, А.А. КУРИЛО¹, М.Ю. ОРЛОВ¹, М.Г. СТРИЖАКОВ¹, С.И. ТКАЧЕНКО^{1,2}, А.Ю. ШАШКОВ¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская область, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕНЕВЫМИ МЕТОДАМИ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ПОЛИМЕРНЫМИ МИШЕНЯМИ В ДИОДЕ СИЛЬНОТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ.

Представлены результаты исследования динамики плазмы в вакуумном диоде [1] методом лазерного теневого фотографирования, в том числе, эффекта нетипично быстрого распространения свечения. Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар» ($I \leq 45$ кА, $U \leq 350$ кВ). Проведены серии экспериментов по регистрации распространения плазмы вдоль оси диода и в поперечном направлении в различных сечениях. Результаты проанализированы и рассмотрены возможные пути продолжения исследований.

E.D. KAZAKOV^{1,2}, YU.G. KALININ¹, D.I. KRUTIKOV¹, A.A. KURILO¹, M.YU. ORLOV¹, M.G. STRIZHAKOV¹, A.YU. SHASHKOV¹, S.I. TKACHENKO^{1,2}

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

THE STUDYING BY SHADOW METHODS OF RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS INTERACTION PROCESSES WITH POLYMERIC TARGETS IN THE HIGH-CURRENT GENERATOR DIODE

The results of a plasma dynamics study in vacuum diode [1] using laser shadow photography, including the effect of atypically rapid propagation of the glow, are presented. Experiments were carried out on the high-current generator «Calamary» ($I \leq 45$ kA, $U \leq 350$ kV). Series of experiments to register the plasma propagation along the diode axis and in the transverse direction in different cross sections were performed. The results were analyzed and possible ways to continue research were considered.

Источником зондирующего излучения в экспериментах служил импульсный твердотельный лазер с активным элементом из монокристалла ортоалюмината иттрия с неодимом. Излучатель такого лазера генерирует вторую гармонику в нелинейном кристалле титанил-фосфата калия (КТР), размещенном внутри резонатора. Излучение второй гармоники имеет следующие параметры: длина волны — 540 нм; длительность гладкого во времени импульса — 200 мкс по

основанию и энергия импульса до 100 мДж. Такие параметры — длинный импульс, и достаточная мощность позволяют использовать лазер для относительно длительного зондирования плазмы с непрерывной регистрацией прошедшего излучения, в том числе для одномерных теневых или шпирен-фотографий объектов с помощью электронно-оптических камер в хронографическом режиме.

В связи с тем, что интенсивность свечения плазмы в исследуемом процессе существенно выше не только интенсивности свечения плазмы на начальных этапах, но и интенсивности лазера, на тенеграммах наблюдаются области собственного свечения, позволяющие идентифицировать изучаемый эффект (рис.1).

Исследование распространения плазмы поперек диодного зазора осуществлялось на трёх его участках: по центру, в прикатодной и прианодной областях. Это позволило сделать предположение о форме плазменного факела и особенностях его распространения.

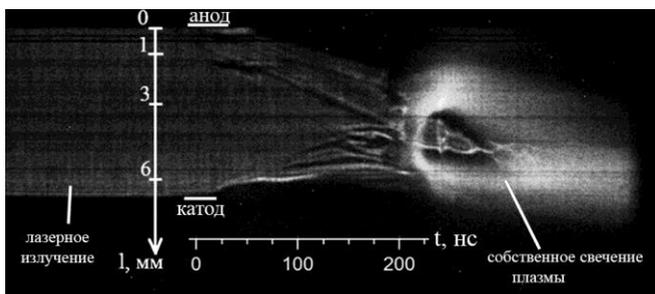


Рис.1. Тенеграмма динамики плазмы с эффектом быстрого распространения свечения от центра зазора к периферии

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00678 мол_а.

Список литературы

1. Ananyev S.S., Dan'ko S.A., Kazakov E.D., Kalinin Y.G., Kurilo A.A., Strizhakov M.G. Behavior specificities of the plasma in the REB – polymeric anode interactions //Journal of Physics: Conference Series 2016 V. 747, № 1, P. 012003.

Н.С. СУХАНОВ¹, К.А. ИВАНОВ¹, И.М. ГАВРИЛИН², Ю.В. КАРГИНА¹,
Ю.В. НАЗАРКИНА², И.В. БОЖЬЕВ¹, Р.В. ВОЛКОВ¹, С.А. ГАВРИЛОВ²,
А.Б. САВЕЛЬЕВ-ТРОФИМОВ¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Национальный Исследовательский Институт «МИЭТ», Зеленоград, Россия

ОСОБЕННОСТИ УСКОРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ГЕНЕРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МИШЕНИ

Исследовано воздействие фемтосекундного лазерного импульса релятивистской интенсивности (свыше 10^{18} Вт/см²) на наноструктурированные мишени. Изучена пространственная картина разлёта быстрых электронов (>300 кэВ) с передней поверхности мишени. Показано, что в плазме на плоской мишени формируется пучок в поле отраженной лазерной волны, тогда как на структурированных мишенях направленность снижается, но значительно растёт количество быстрых частиц. Обнаружено, что оптическая эмиссия плазмы на удвоенной частоте отражает диаграмму разлёта электронов, что даёт возможность судить о состоянии поверхности мишени в области взаимодействия. Рентгеновские измерения показали, что рост количества быстрых электронов приводит к увеличению выхода жесткого рентгеновского излучения в несколько раз в диапазоне до 1 МэВ.

N.S. SUKHANOV¹, K.A. IVANOV¹, I.M. GAVRILIN², YU.V.
KARGINA¹, YU.V. NAZARKINA², I.V. BOZHEV¹, R.V. VOLKOV¹, S.A.
GAVRILOV², A.B. SAVEL'EV-TROFIMOV¹

¹M.V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia

²National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Russia

PECULIARITIES OF CHARGED PARTICLES ACCELERATION, GENERATION OF OPTICAL AND X-RAY RADIATION AT RELATIVISTIC LASER INTERACTION WITH NANOSTRUCTURED TARGETS

The action of femtosecond laser pulse with relativistic intensity (over 10^{18} W/cm²) onto nanostructured targets was studied. Spatial distribution of fast electrons (>300 keV) from front surface was examined. It was shown that in the plasma of flat targets the particles form a bunch in the specular direction, whereas on the structured targets the directionality is decreased, however the fast particles flux grows substantially. It was found that optical emission at doubled frequency reflects the electrons spatial diagram, which may be used for surface estimation in the interaction area. X-ray measurements revealed that the hot particles population growth leads to increased hard X-ray yield in the range up to 1 MeV.

В работе изучены особенности ускорения электронов до высоких энергий в плазме, создаваемой на поверхности твердотельных мишеней релятивистским

лазерным импульсом (50фс, 800нм, 10 Гц, контраст по пьедесталу УСЛ лучше 10^9 , $I_{\text{peak}} > 10^{18}$ Вт/см²). В качестве мишеней применялись плоские подложки, а также наноструктурированные образцы с разной морфологией (нанопоры, нанонити и т.д.), полученные путём электрохимического травления и осаждения на кремниевые подложки.

Обнаружено, что на плоских мишенях ускорение электронов происходит преимущественно в конус по направлению отраженного излучения, что связано с захватом частиц полем импульса. При воздействии на структурированные мишени направленность быстрых частиц снижается, разлёт идёт в широкий телесный угол. При этом более мелкие структуры (нанонити) способствуют этому из-за более развитой морфологии поверхности и более сложной динамики электронов в результирующем поле лазера и плазмы. При этом температура электронов на структурированных образцах возрастает по сравнению с плоской мишенью примерно в 1.5 раза и достигает 240 кэВ, а их количество возрастает в несколько раз.

Диагностика оптической эмиссии плазмы показала, что на резкой границе плазма-вакуум идёт генерация второй гармоники по направлению отраженного импульса. При этом показано, что спекл-структура второй гармоники в дальней зоне в целом совпадает с направлением вылет пучков электронов. Как и в электронной диагностике, более мелкие структуры дают более диффузную картину второй гармоники. Данная информация может служить для оценки состояния поверхности мишени в области взаимодействия, которая может быть частично разрушена под воздействием предимпульсов лазерного импульса и отличаться от исходной. Такие сведения представляют также интерес для корректного численного моделирования лазерно-плазменного взаимодействия.

Измерения спектров жесткого рентгеновского излучения плазмы показали, что выход квантов с энергией до 1 МэВ на структурированных мишенях возрастает по сравнению с плоской мишенью. Максимальная эффективность преобразования достигается для мишени из нанонитей кремния и составляет $\sim 4 \times 10^{-40}\%$ в интервале 20-200 кэВ и около $10^{-60}\%$ в диапазоне 200-1000 кэВ.

А.Б. ТАЖЕН, М.К. ДОСБОЛАЕВ,
Ж.Р. РАЙЫМХАНОВ, Т.С. РАМАЗАНОВ,

*Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
КазНУ, Алматы, Казахстан*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

В работе с помощью высокоскоростной камеры Phantom VEO710S была исследована динамика квазистационарного плазменного потока в начальной стадии развития разряда и ускорения плазмы.

M.K. DOSBOLAYEV, A.B. TAZHEN, ZH.R. RAIYMKHANOV, T.S.
RAMAZANOV

Institute of Experimental and Theoretical Physics, KazNU, Almaty, Kazakhstan

STUDY OF DYNAMICS OF PLASMA FLOW ON A PULSED PLASMA ACCELERATOR

In work using a high-speed camera Phantom VEO710S, the dynamics of quasistationary plasma flow was investigated in early stage of development of the discharge and in the stage of plasma acceleration.

Импульсные плазменные ускорители успешно используется для моделирования процессов в термоядерных установках. Например, взаимодействия высокоэнергичной плазмы с кандидатными материалами [1-4]. В реальных термоядерных установках провести серийные научные эксперименты очень дорого, а также не всегда хватает вычислительных ресурсов для моделирования. Используемый в этой работе плазменный ускоритель коаксиального типа с энергией, запасённой на конденсаторах 26 кДж способен создавать условия близкие к термоядерным. Радиусы внутреннего и внешнего электрода ускорителя 27,5 мм и 54 мм. К отдельным блокам входят также система конденсаторных батарей, вакуумная система и пульт дистанционного управления. Динамика плазменного потока в плазменном ускорителе в начальной стадии развития разряда и в стадии ускорения плазмы была исследована высокоскоростной камерой Phantom VEO710S. При скорости съёмки 51000 кадр/с, временем экспозиции 1,5 мкс в начальной стадии развития разряда нами была зафиксирована образование плазменной (токовой) перемычки (рис. 1а).

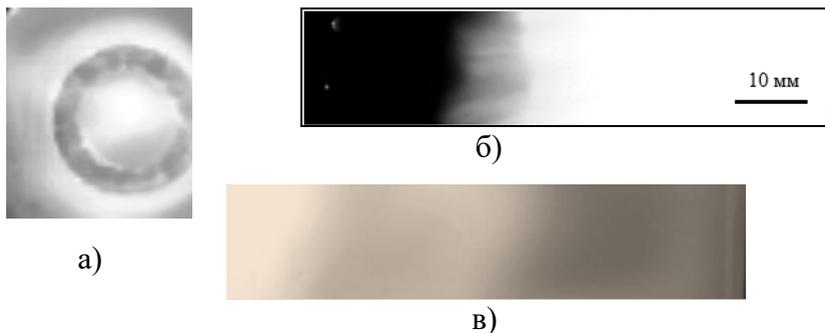


Рис. 1. Образование токовой перемычки газового разряда между электродами (вид спереди 1а) и мгновенная фотография ускоряющейся плазмы (вид с боку 1б и 1в). Напряжение на электродах 4 кВ. Контур черного круга на рисунке 1а соответствует диаметру (55 мм) внутреннего электрода.

Скорость ускоряющегося плазменного потока составляет 26600 м/сек. Кроме того, в экспериментах наблюдались отражение плазмы с торца вакуумного реактора и столкновение отрицательных и положительных потоков. Максимальная скорость отраженной плазмы достигала порядка 12320 м/с (рис. 1в). Так как в данном случае распределение свечения потока равномерно, эту скорость можно сопоставить со скоростями нейтралов и ионов. Тогда по следующей формуле, связывающую температуру микрочастиц в импульсном плазменном потоке со скоростью, можно определить температуру нейтралов и ионов. Например, для отрицательного плазменного потока в рисунке 1в, температура частицы составляет приблизительно 18000 К.

$$T = \frac{v^2 m}{c^2 (4.3)^2 10^{-14}}, \quad (1)$$

здесь, v – скорость плазменного потока, m – атомный вес.

Список литературы

1. Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. // Laser and Part. Beams. 2017. № 4, P. 741-749.
2. Dosbolayev M., Raiymkhanov Zh., Tazhen A., Ramazanov T. // IEEE Trans. on plasma science. 2019. № 7, P. 3047-3051.
3. Коваленко Д.В., Климов Н.С., Житлухин А.М. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2014. т. 37, № 4, P. 39-48.
4. Krashennnikov S.I., Smirnov R.D., Rudakov D.L. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2011. № 53, P. 083001.

**Ж.Р. РАЙЫМХАНОВ, М.К. ДОСБОЛАЕВ,
А.Б. ТАЖЕН, М.Е. ПШИКОВ**

*Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
КазНУ, Алматы, Казахстан*

СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Нами была проведена спектроскопическая диагностика плазмы в импульсном плазменном ускорителе. Исследованы результаты спектральной диагностики, а именно, спектральных линий плазмообразующего газа, азота и кислорода. Также были получены и проанализированы эмиссионные спектры импульсной плазмы при взаимодействии с графитовой мишенью.

**ZH.R. RAIYMKHANOV, A.B. TAZHEN,
M.K. DOSBOLAYEV, M.E. PSHIKOV**

*Research Institute of Experimental and Theoretical Physics,
KazNU, Almaty, Kazakhstan*

SPECTRAL DIAGNOSTICS OF A PULSE PLASMA FLOW

We performed spectroscopic diagnostics of plasma in a pulsed plasma accelerator. The results of spectral diagnostics, namely, the spectral lines of a plasma-forming gas, nitrogen and oxygen, are investigated. The emission spectra of pulsed plasma interacting with a graphite target were also obtained and analyzed.

Исследования физических явлений в пристеночной плазме привлекают все большее внимание. Взаимодействие высокотемпературной плазмы с лицевой поверхностью защитных стенок, обращенных к плазме, происходит практически во всех типах токамаков [1]. Для того чтобы контролировать эти взаимодействия, необходимо проведение тщательной диагностики пристеночной плазмы. В токамаках в основном используется бесконтактные методы диагностики, например лазерный метод [2].

Эксперименты проводились на модельной установке импульсный плазменный ускоритель [3]. Были обработаны спектроскопические методы диагностики плазмы в импульсных плазменных ускорителях. Система визуализации, регистрации и обработки спектральной информации позволяла в режиме реального времени анализировать спектральный состав излучения плазмы и линейное распределение интенсивности в диапазоне спектральных компонент. Регистрацию спектров проводили с помощью дифракционного линейного спектрометра «S-100». В ходе экспериментов спектрометр устанавливался перпендикулярно оси ускорения плазменного потока. Эксперименты проводились в два этапа, в первую очередь был снят

эмиссионный спектр проходящего плазменного потока, затем спектр плазмы при взаимодействии с углеродной мишенью.

На рисунке 1 показан эмиссионный спектр импульсной плазмы до (0) и после (1) взаимодействия с графитовой мишенью. Можно заметить, что при взаимодействии с плазмой поверхностный слой мишени довольно сильно испаряется.

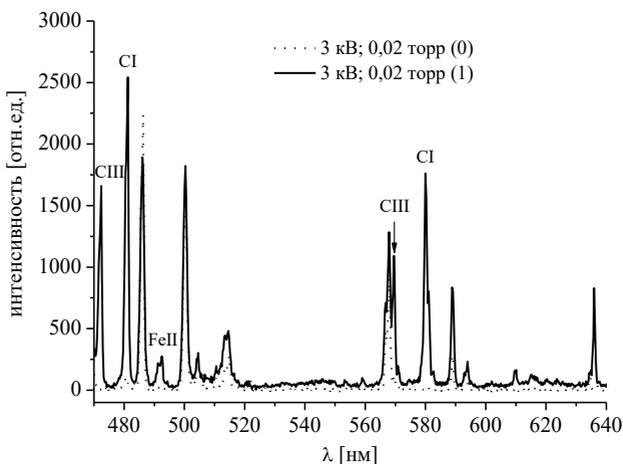


Рис.2. Эмиссионный спектр импульсной плазмы до и после взаимодействия с графитовой мишенью

Так как плазменный ускоритель является моделью термоядерных реакторов, точнее используется для экспериментального моделирования процессов, протекающих в термоядерных реакторах, то данный процесс можно обнаружить и в термоядерных реакторах, где чистота плазменной среды считается один из главных критериев.

Список литературы

1. J C Flanagan, M Sertoliet. all. Characterising dust inJET with the new ITER-like wall // Plasma Phys. Control. Fusion 57 (2015) 014037 (11pp)
2. A.P. Kuznetsov. Quadrature laser interferometry in the pulsed plasma diagnostic // Journal of Physics: Conference Series. —2016. —Vol.666. —P.012017.
3. Dosbolayev M., RaiymkhanovZh., Tazhen A., Ramazanov T. // IEEE Trans. on plasma science.2019. № 7, 3047-3051.

В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ¹, С.А. МАЙОРОВ²,
Г.Б. РАГИМХАНОВ¹, З.Р. ХАЛИКОВА¹

¹ Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

О ВЛИЯНИИ МАЛЫХ ПРИМЕСЕЙ МЕТАЛЛА НА ИОНИЗАЦИОННО-ДРЕЙФОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОНА В ИНЕРТНОМ ГАЗЕ

Приведены результаты численного моделирование методом Монте-Карло ионизационных и дрейфовых характеристик (коэффициента Таунсенда, дрейфовой скорости, средней энергии, коэффициента убегания) электронов в ксеноне с парами железа при приведенной напряженности электрического поля в диапазоне $E/N = 1 - 1000$ Тд.

V.S. KURBANISMAILOV¹, S.A. MAIOROV², G.B. RAGIMKHANOV¹,
Z.R. KHALIKOVA¹

¹ Dagestan State University, Makhachkala, Russia

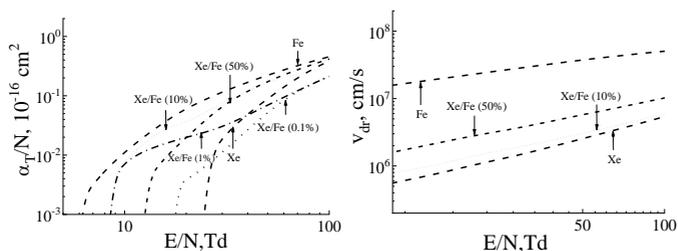
² Institute of General Physics A.M. Prokhorova RAS, Moscow, Russia

ABOUT THE INFLUENCE OF SMALL IMPURITIES OF METAL ON IONIZATION-DRIFT CHARACTERISTICS OF ELECTRON IN AN INERT GAS

The results of numerical simulation by the Monte Carlo method of ionization and drift characteristics (Townsend coefficient, drift velocity, average energy, runaway coefficient) of electrons in xenon with iron vapor at a given electric field strength in the range $E / N = 1 - 1000$ Td are presented.

В сильном электрическом поле электроны при определенных условиях могут набирать больше энергии, чем терять ее в столкновениях с атомами, ионами и электронами. Это явление впервые было рассмотрено Вильсоном еще в 1925 году [1]. Такие электроны, названные убегающими, играют большую роль в физике полностью ионизованной плазмы [2, 3], физике атмосферного электричества [4 - 5].

Пары железа в газе могут появляться из-за распыления железного катода ионами рабочего газа в тлеющем разряде, из-за взрывных процессов на катоде в импульсных разрядах при больших перенапряжениях. Поэтому анализ влияния небольших примесей атомов металла на ионизационно-дрейфовые характеристики разрядов представляется актуальной задачей [6, 7].



а) б)

Рис. 1 Зависимости приведенного ионизационного коэффициента Таунсенда (а) и скорости дрейфа электронов (б) от E/N .

В частности, на рис.1. приведены характерные зависимости ионизационного коэффициента Таунсенда (а) и скорости дрейфа электронов (б) в чистом ксеноне, в чистом железе и ксеноне с 0,1%, 1%, 10% и 50% содержанием паров железа.

Полученные результаты свидетельствуют о резком изменении характеристик ионизации и убегания электронов при добавлении в ксенон паров железа. Начиная с долей процента, из-за сильной ионизации атомов железа, происходит резкое изменение функции распределения электронов, что приводит к значительному увеличению частоты ионизации и появлению значительного числа ионов примеси, зависимость числа убегających электронов от концентрации паров железа носит сложный, немонотонный характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00611а)

Список литературы

1. Wilson C.T.R. 1925 Proc. Cambridge Philos. Soc. Vol.22, № (4), P.534–538.
2. Трубников, Б.А. Столкновения частиц в полностью ионизованной плазме // Вопросы теории плазмы. Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 1. с.98-182.
3. Сивухин, Д.В. Кулоновские столкновения в полностью ионизованной плазме.// Вопросы теории плазмы. Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1964. Вып. 4, с.81-187.
4. Gurevich A.V., MMilikh G., Roussel-Dupre R. 1992 Physics Letters. Vol. 165, №5, P. 463.
5. Gurevich, A.V., Zybin K.P. 2001 Phys. Usp. Vol. 44., P. 1119–1140.
6. Golyatina R.I., Maiorov S.A. 2018 Plasma Phys. Reports. Vol. 44, № 4. pp. 453–457.
7. Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б. 2019 Журнал технической физики. Т 89, № 3. – С. 384-387.

В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ¹, С.А. МАЙОРОВ²,
Г.Б. РАГИМХАНОВ¹, З.Р. ХАЛИКОВА¹

¹ Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕЙФА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИОНОВ В КСЕНОНЕ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Представлены результаты численного моделирования методом Монте-Карло диффузионно-дрейфовых характеристик металлических ионов (Li^+ , Be^+ , Al^+ , Fe^+ , Cu^+ , W^+ , Hg^+ , Au^+) в ксеноне постоянном и однородном электрическом поле при приведенных напряженностях электрического поля при $1 < E/N < 1000$ Td и температуре атомов ксенона $300 < T < 1000\text{K}$.

V.S. KURBANISMAILOV¹, S.A. MAIOROV²,
G.B. RAGIMKHANOV¹, Z.R. KHALIKOVA¹

¹ Dagestan State University, Makhachkala, Russia

² Institute of General Physics A.M. Prokhorova RAS, Moscow, Russia

CHARACTERISTICS OF METAL ION DRIFT IN XENON IN EXTERNAL ELECTRIC FIELD

The results of numerical simulation by the Monte Carlo method of the diffusion-drift characteristics of metal ions (Li^+ , Be^+ , Al^+ , Fe^+ , Cu^+ , W^+ , Hg^+ , Au^+) in xenon in a constant and uniform electric field at reduced electric field strengths at $1 < E/N < 1000$ Td are presented and a temperature of xenon atoms of $300 < T < 1000\text{K}$.

Кинетические характеристики дрейфа металлических ионов в собственных парах и инертных газах представляют большой интерес, поскольку в современных технологиях часто используют плазменные процессы, при которых в активной зоне имеются пары металлов. Хорошо известно, что иногда даже очень малые примеси (миллионные доли) способны радикально менять свойства разряда [1–3].

Для моделирования ион-атомных столкновений при движении иона в однородном электрическом поле проводилось интегрирование уравнений движения ионов по схеме Рунге-Кутты второго порядка точности. На каждом шаге по времени разыгрывалось столкновение иона с атомом. Алгоритм моделирования ион - атомного столкновения описан в работе [1-2,3].

Изучено влияние температуры газа T_a и поля E/N на диффузионно-дрейфовые характеристики ионов металла.

Установлено, что при увеличении напряженности поля:

1) увеличивается скорость дрейфа и появляется анизотропия распределения ионов по направлениям, увеличивается дисперсия функции распределения (температура);

2) в распределении ионов по скоростям как в направлении вдоль поля так и в направлении поперек поля появляется сильное отклонение от сдвинутого максвелловского распределения;

Для демонстрации влияния температуры атомов и поля на характер зависимости коэффициентов продольной и поперечной диффузии от напряженности электрического поля выполнены расчеты отношения коэффициентов продольной и поперечной диффузии: $D_{||}/D_{\perp}$ при различных температурах атомов: 300 К, 600 К и 1000 К.

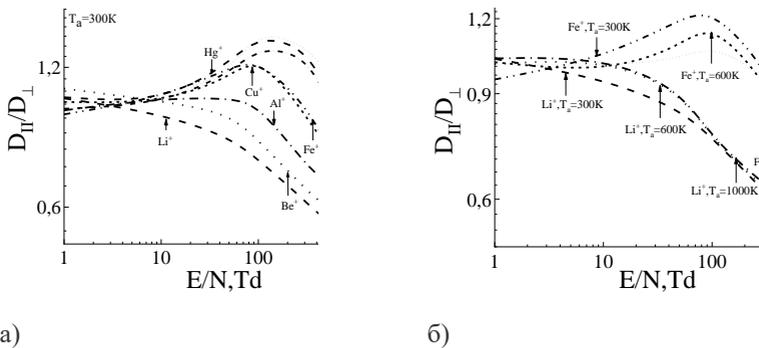


Рис.1 Отношение коэффициентов диффузии металлических ионов вдоль и поперек поля при их дрейфе в ксеноне при плотности атомов $n_a = 2,69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Результаты расчетов наглядно демонстрируют влияния температуры атомов на характер зависимости коэффициентов продольной и поперечной диффузии от напряженности электрического поля выполнены соответствующие расчеты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00611а)

Список литературы

1. Maiorov S.A. Ion drift in a gas in an external electric field//Plasma Physics Reports.2009.Vol.35.
2. Golyatina R.I. and Maiorov S.A. Approximation of the characteristics of ion drift in parent gas // Plasma Physics Reports. – 2017. – Vol. 43, № 1. – P. 75–82.
3. Kurbanismailov V.S., Maiorov S.A., Omarov O.A., and Ragimkhanov G.B. // Journal Technical Physics. – 2019. – V. 89, № 3. – P. 388–391.

Н.С. СЕРГЕЕВ¹, А.В. КАЗИЕВ¹, Д.Г. АГЕЙЧЕНКОВ¹, Д.В. КОЛОДКО^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ», Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, МО, Россия

ОСАЖДЕНИЕ ОКСИДОВ НИКЕЛЯ И ВОЛЬФРАМА В ИМПУЛЬСНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

Получены прозрачные оксидные покрытия с толщинами порядка сотен нанометров на проводящем подслое FTO. Осаждение оксидных пленок никеля и вольфрама проводилось в стационарных (dcMS) и импульсных (HiPIMS) режимах магнетронного разряда. Определены стехиометрия и размер зерен полученных пленок методом рентгеноструктурного анализа.

N.S. SERGEEV^{1,2}, A.V. KAZIEV¹, D.G. AGEYCHENKOV¹,
D.V. KOLODKO^{1,3}

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

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³ Institute of Science Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino, MR, Russia

DEPOSITION OF NICKEL AND TUNGSTEN OXIDE FILMS IN PULSED AND STATIONARY MAGNETRON DISCHARGE REGIMES

Transparent oxide coatings with thicknesses of the order of hundreds nanometers were obtained on the conducting FTO sublayer. The deposition of oxide films of nickel and tungsten was carried out in stationary (dcMS) and pulsed (HiPIMS) magnetron discharge regimes. The films stoichiometry and the value of grain size were determined by x-ray diffraction analysis.

Оксиды вольфрама (WO_x) используются при производстве карбида вольфрама, некоторых огнестойких материалов, высокопрочной керамики, в качестве материала *сцинтилляционных детекторов*, а также для создания газовых сенсоров, электрохромных и газохромных покрытий [1]. Оксиды никеля (NO_x) применяются при производстве полупроводниковых приборов и элементов, например, в термисторах, варисторах и в качестве элементов солнечных батарей [2, 3].

В работе исследуются различные режимы осаждения оксидов вольфрама и никеля из металлических мишеней на проводящую подложку (FTO, $SnO_2:F$). Для осаждения покрытий применялась конфокальная магнетронная распылительная система MAGNETO-3GABS.

Осаждение проводилось в стационарных (dcMS) и импульсных (HiPIMS с длительностью импульса 5–10 мкс и l-HiPIMS с длительностью импульса 10–100 мс) режимах магнетронного разряда при средних мощностях $P_{dcMS} \sim 20$ Вт, $P_{HiPIMS} \sim 50$ –80 Вт, соответственно. Нанесение осуществлялось в смесях аргона и кислорода с варьируемым процентным содержанием последнего.

В результате осаждения были получены прозрачные покрытия с толщинами порядка сотен нанометров. Для определения стехиометрии и размера зерен полученных пленок был проведен рентгеноструктурный анализ (XRD). Использовались кварцевый монохроматор и излучение линии $\text{CuK}\alpha_1$ с длиной волны 1.5406 Å [4]. На рис. 1 приведен пример рентгеновской дифрактограммы полученных покрытий.

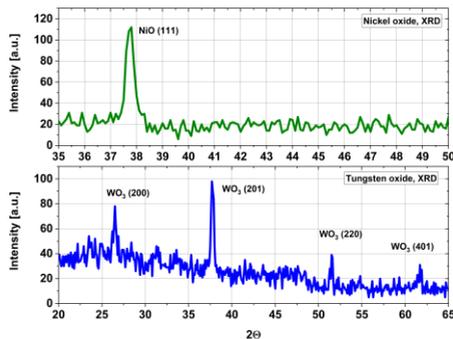


Рис. 1. Дифрактограммы покрытий, осажденных в режиме импульсного магнетронного разряда (HiPIMS)

Список литературы

- [1] A. V. Almaev et. al. // Technical Physics Letters 2019, Vol. 45, No. 10, pp.1016–1019;
- [2] A. S. Aglikov et. al. // Technical Physics 2019, Vol. 64, No. 3, pp. 422–426.
- [3] D. Gogova et. al. // Thin Solid Films 2009, Vol. 517, pp. 3326–3331.
- [4] V.I. Anisimkin et. al. // Russian Ultrasonics 1989, Vol. 19, No. 4, pp. 189–192.

Р.А. ЯХИН¹, С.Ю. ГУСЬКОВ¹, Н.Н. ДЕМЧЕНКО¹, Н.В. ЗМИТРЕНКО²,
П.А. КУЧУГОВ²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, РФ

СЖАТИЕ И ГОРЕНИЕ МИШЕНЕЙ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В УСЛОВИЯХ ЗАЖИГАНИЯ СХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Представлены результаты расчётно-теоретического исследования сжатия и горения термоядерной мишени при её зажигании сфокусированной ударной волной, образующейся при воздействии профилированного по времени лазерного импульса 2-ой гармоники излучения Nd-лазера мегаджоульного уровня.

R.A. YAKHIN¹, S.Y. GUS'KOV¹, N.N. DEMCHENKO¹, N.V.
ZMITRENKO², P.A. KUCHUGOV²

¹Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Russia

COMPRESSION AND COMBUSTION OF SHOCK IGNITED INERTIAL FUSION TARGETS

The results of computational and theoretical study of the thermonuclear target compression and combustion when it is ignited by a focused shock wave are presented. The studies were carried out for the conditions of irradiation by a time-profiled laser pulse of the 2-nd harmonic Nd-laser of laser with energy about 2 MJ.

Зажигание сходящейся сфокусированной ударной волной (УВ) [1] (далее УВ-зажигание, в зарубежной литературе «shock ignition») мишеней лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) представляет собой одно из перспективных направлений снижения лазерной энергии, необходимой для зажигания. Этот метод предусматривает воздействие на мишень традиционной конструкции в виде тонкой сферической оболочки, содержащей слой DT-льда, лазерного импульса, мощность которого возрастает по специальному закону, обеспечивающему частичное разделение процессов сжатия и нагрева мишени при достаточно высокой степени кумуляции энергии за счёт столкновения расходящейся (отражённой от центра) и сходящейся (зажигающей) ударных волн.

В работе представлены результаты расчётно-теоретического исследования зажигания мишени ЛТС сфокусированной ударной волной в условиях облучения импульсом излучения 2-ой гармоники Nd-лазера, соответствующих российскому проекту мегаджоульной установки. Определены параметры двухслойной оболочечной мишени и лазерного импульса 2-ой гармоники Nd-

лазера, которые при УВ-зажигании отвечают достижению коэффициента усиления около 110 (по отношению к поглощенной лазерной энергии). Выполненные численные расчеты продемонстрировали возможность того, что в указанных условиях облучения, с использованием УВ-зажигания могут быть достигнуты коэффициенты усиления в несколько раз более высокие при энергии лазерного импульса, сравнимой с энергией, необходимой для традиционного искрового сжатия и зажигания. Вместе с тем, было определено, что характеристики сжатия и горения мишени в схеме УВ-зажигания обладают более высокой чувствительностью к рассогласованию параметров мишени и лазерного импульса по сравнению с искровым зажиганием.

Список литературы

1. В.А. Щербаков. Физика плазмы 9, 409 (1983).

Р.И. ХУСНУТДИНОВ^{1,2}, В.С. НЕВЕРОВ², Е.А. ВЕЩЕВ³,
А.Б. КУКУШКИН^{1,2}, А.Р. ПОЛЕВОЙ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ITER Organization, Saint-Paul-lès-Durance, Франция

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОГО ПРОФИЛЯ СВЕТИМОСТИ $D\alpha$ В ПРИСТЕНОЧНОМ СЛОЕ И ДИВЕРТОРЕ ИТЭР В РАМКАХ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДХОДА МАТРИЦ ПЕРЕНОСА ЛУЧЕЙ

Решена томографическая задача восстановления аксиально-симметричного профиля светимости дейтерия в линии $D\alpha$ в пристеночном слое и диверторе ИТЭР по измеренным сигналам. Использован метод матриц переноса лучей. Показано, что в сценариях, где отраженный сигнал из дивертора не превышает сигнал из пристеночной плазмы более, чем в 10 раз, возможно восстановить профиль светимости и отфильтровать отраженный свет в наблюдаемом сигнале с требуемой точностью при известных с высокой точностью характеристиках отражения света первой стенкой. Проанализирована зависимость ошибки фильтрации отраженного света от отклонения предполагаемых характеристик отражения стенки от истинных.

R.I. KHUSNUTDINOV^{1,2}, V.S. NEVEROV², E.A. VESHCHEV³,
A.B. KUKUSHKIN^{1,2}, A.R. POLEVOI³

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

³ITER Organization, Saint-Paul-lès-Durance, France

RECONSTRUCTION OF 2D $D\alpha$ EMISSION PROFILE IN THE SOL AND DIVERTOR IN ITER USING THE RAY TRANSFER MATRIX APPROACH IN SYNTHETIC DIAGNOSTIC

A tomographic problem is solved for reconstructing the two-dimensional (axially symmetric) $D\alpha$ emission profile in the scrape-off layer (SOL) and divertor in ITER using signal on detectors and ray transfer matrices. It's shown that if the light reflection properties of the first wall are known with accuracy, it is possible to recover the emission profile and filter out the reflected light observed in the main chamber with required accuracy in cases where the reflected signal from divertor does not exceed the signal from SOL by more than 10 times. The dependence of the reflection filtering error on the discrepancy between the expected and the true light reflection properties of the first wall is analyzed.

В рамках синтетической диагностики [1] решается томографическая задача, заключающаяся в восстановлении двумерного (аксиально-симметричного) профиля светимости дейтерия в линии $D\alpha$ в пристеночном слое и диверторе ИТЭР по измерениям интенсивности $D\alpha$ в полях обзора диагностик «Divertor Impurity Monitor» и «H-alpha (and Visible) Spectroscopy». Учитывается отражение

света металлической стенкой вакуумной камеры. Для решения задачи использован подход матриц переноса лучей [2], содержащих коэффициенты трансформации сигналов от индивидуальных источников света единичной светимости в интенсивности пикселей на детекторе и выполняющих роль функций Грина в этой и аналогичной задаче [3]. Расчеты выполнены методом трассировки лучей с использованием кодов Raysect (www.raysect.org) и Cherab (<https://github.com/cherab>) [4], которые были дополнены нами быстрым алгоритмом вычисления матриц переноса лучей, в сотни раз превосходящим по скорости способ, использованный в [2]. В качестве синтетических данных для светимости Da в пристеночном слое и диверторе ИТЭР использованы результаты моделирования [5] кодом SOLPS4.3 [6] (основанном на коде B2-EIRENE [7, 8]) с расширенной (с помощью кода OSM [9]) пристеночной расчётной сеткой.

Показана возможность фильтрации отраженного света в наблюдаемом сигнале в основной камере и частичного восстановления двумерного профиля светимости Da в сценариях с высокой плотностью плазмы в пристеночном слое, когда отраженный свет из дивертора (фоновый сигнал) превышает излучение в пристеночном слое (полезный сигнал) не более, чем в 10 раз. Ключевыми факторами, влияющими на точность результата, являются точность модели отражения света первой стенкой и наличие таких полей обзора основной части вакуумной камеры токамака, в которых одни и те же участки пристеночного слоя наблюдаются под разными углами.

Список литературы

1. A.B. Kukushkin, V.S. Neverov, A.G. Alekseev, S.W. Lisgo, A.S. Kukushkin. Fusion Sci. Tech., 2016, 69 (3), 628-642.
2. S. Kajita, E. Veshchev, R. Barnsley, M. Walsh, Contrib. Plasma Phys., 2016, 56 (9), 837-845.
3. A.R. Polevoi, et al., 45th EPS Conf. on Plasma Phys. July 2–6 2018, Prague, Czech Republic, P4.1009.
4. M. Carr, A. Meakins, et al., Rev. Sci. Instrum., 2018, 89, 083506.
5. S.W. Lisgo, private communications, 2012.
6. A.S. Kukushkin, et al., Fusion Eng. Des., 2011, 86, 2865.
7. B. J. Braams, PhD thesis (Rijksuniversitet, Utrecht, 1986).
8. D. Reiter, M. Baelmans, and P. Boerner, Fusion Sci. Tech., 2005, 47, 172-186.
9. S.W. Lisgo et al. J. Nucl. Mater., 2011, 415, 965-968.

В.В. КУЗЕНОВ, А.О. ДОБРЫНИНА, А.В. СТАРОСТИН,
В.В. ШУМАЕВ

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ МИШЕНЬ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В данной работе представлен новый вариант метода численного решения уравнений радиационной магнито-плазмотоники. Разработанная численная методика была верифицирована с помощью решения ряда тестовых (модельных) задач. Выполненные в работе одномерные расчеты плазмотоники параметров цилиндрической мишени для комбинированной схемы воздействия магнито-инерциального термоядерного синтеза учитывают широкий спектр физических эффектов и дают качественную информацию о динамике процессов на тех участках трехмерной мишени, где плотность мощности лазерного излучения наиболее интенсивна либо относительно мала.

V.V. KUZENOV, A.O. DOBRYNINA, A.V. STAROSTIN,
V.V. SHUMAEV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF INTENSE ENERGY FLOWS ON A CYLINDRICAL TARGET IN A MAGNETIC FIELD

In this paper, a new version of the method for numerically solving the equations of radiation magneto-plasma dynamics is presented. The developed numerical technique was verified by solving a number of test (model) problems. The one-dimensional calculations of the plasma dynamic parameters of a cylindrical target for the combined scheme of the effects of magnetic inertial fusion take into account a wide range of physical effects and provide qualitative information on the dynamics of processes in those parts of a three-dimensional target where the laser radiation power density is most intense or relatively low.

В работе применен разработанный соавторами элемент многоуровневой вычислительной модели [1-6], который позволяет исследовать эволюцию сжатия и энерговыделения в мишени магнито-инерциального термоядерного синтеза (МИТС) [7-11] при последовательном (относительно времени) увеличении интенсивности системы ударных волн, падающих на геометрическую ось системы, благодаря комбинированному воздействию на неё интенсивного лазерного излучения (в торцевом – на завершающей стадии сжатия и перпендикулярном образующей направлениях) и внешней (по отношению к мишени), ограничивающей расширение плазмы мишени, системы импульсных струй.

Одной из целей работы является оценка возможности с помощью относительно «слабо» интенсивных воздействий (комбинированная схема)

достижения «термоядерных» параметров в плазме МИТС, а также оценка возможности создания компактных генераторов нейтронов на основе комбинированной схемы воздействия. В принципе такая схема может позволить сформировать нейтронный выход на уровне $10^{12} \div 10^{16}$ нейтронов за импульс [12].

Показано, что главным физическим фактором, ответственным за рост параметров плазмы вблизи оси симметрии мишени МИТС, является увеличение интенсивности ударной волны, падающей на геометрическую ось системы. Учет не одномерности физических процессов и вопросов, связанных с гидродинамическими неустойчивостями (возникающие в процессе сжатия мишени МИТС), из которых основную роль играют неустойчивости Рэлея-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова, требует дальнейшего отдельного, подробного изучения.

Список литературы

1. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 9. С. 19–32. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Известия РАН. Серия Физическая. 2016. Т. 80. С. 659–663.
2. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Journal of Phys.: Conf. Series. 2017. V. 830. P. 012124.
3. Кузенов В.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2016. Т. 7, № 4. С. 342–346.
4. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Shumaev V. V. // Problems of Atomic Science and Technology. 2015. No. 4 (98). P. 53-56.
5. Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. // ZAMP. 2019. V. 70. P. 46.
6. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 830. P. 012049.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Journal of Phys.: Conf. Series. 2017. V. 815. P. 012024.
8. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Shumaev V. V. // Problems of Atomic Science and Technology. 2015. No. 1 (95). P. 97-99.
9. 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.
10. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.
11. Ryzhkov S.V. // Sustainable Cities and Society. 2015. V. 14. P. 313–315.
12. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure // Physics of Plasmas. 2019. V. 26. P. 092704.

А.Е. ШИКАНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ

МОДЕЛЬ СФЕРИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ИОННОГО ДИОДА С ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ АНОДОМ

Предложена модель сферического импульсного ионного диода с лазерно-плазменным анодом, предназначенная для проведения компьютерного эксперимента. Формирование анодной поверхности и извлечение дейтронов в диодный зазор рассматривается на основе адиабатического механизма расширения лазерной плазмы в виде ударной волны Римана с учетом влияния на эти процессы электростатических колебаний в области границы плазма- вакуум.

A.E. SHIKANOV

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

MODEL OF SPHERICAL PULSE ION DIODE WITH LASER-PLASMA ANODE

The model of spherical pulse ion diode with laser plasma anode was proposed for computer experiment. Anode surface forming and deuteron extraction to diode gap are considering by means of adiabatic mechanism of laser plasma expansion as Riman shock wave with excluding of electrostatic oscillation influence on these processes.

В работах [1,2] были описаны физические модели ионного диода с лазерно-плазменным анодом. Они была успешно использованы при создании ускорительных трубок (УТ) [3,4], генерирующих рекордные для своего класса изделий нейтронные импульсы с длительностью ~мкс. Для реализации ряда новых ядерных технологий требуются подобные УТ, работающие с длительностью импульса $\sim(10-10^2)$ нс [5].

Для компьютерного проектирования таких изделий модели, описанные в [1,2], оказались недостаточно адекватными из-за некорректного описания пространственно- временных зависимостей плотности дейтронов в плазме при малых длительностях ускоряющего импульса. В докладе предлагается усовершенствованная модель ионного диода, также, как в [1], использующая представление о разлете плазмы в виде ударной волны Римана и, как в [2], учитывающая влияние электростатических колебаний в области границы плазма- вакуум, но лишенная отмеченного выше недостатка, связанного с описанием дейтронной плотности.

Процесс формирования дейтронного пакета разбивается на две стадии. На первой ток ускоренных дейтронов определяется законом Богуславского-Чайлда- Ленгмюра. Вторая начинается в момент времени, когда этот ток

становится равным максимальному эмиссионному току, который может быть извлечен из плазмы в момент времени t .

Эмиссионный ток зависит от параметров плазмы и складывается из термо и электродинамических составляющих. Первая характерна для ионных источников со стационарной поверхностью отбора ионов и пропорциональна квадратному корню из температуры плазмы. Вторая, являясь следствием оголения дейтронов в окрестности плазменного фронта из-за колебаний Ленгмюра и вовлечения их в процесс ускорения при их отрицательной фазе, пропорциональна произведению частоты и амплитуды колебаний - $\omega_L(t)A_L(t)$ в области плазменной границы, связанных адиабатическим инвариантом: $A(t)L^2\omega_L(t)=const$.

С использованием описанного алгоритма были рассчитаны временные зависимости тока дейтронов ускоряемых в диоде при различных значениях амплитуды ускоряющего импульса, энергии лазерного импульса и времени задержки высоковольтного импульса относительно лазерного. Анализ результатов проведенного компьютерного эксперимента, позволяет сделать вывод, что в диоде с амплитудой высоковольтного импульса, энергии лазерного импульса и размерах устройства не превышающих соответственно 500кВ, 1Дж и 0.1м реально формировать дейтронные пакеты с амплитудой тока до 12 кА с длительностью импульса в диапазоне (20-60)нс.

Следует отметить, что параметры дейтронного пакета существенно зависят от времени задержки высоковольтного импульса относительно лазерного. Поэтому при проведении экспериментов с реальными диодами для генерации нейтронов можно ставить вопрос о выборе оптимальной задержки.

Список литературы

1. Shikanov A.E. Acceleration of deuteron in a spherical diode with a laser- plasma anode. Soviet Physics Journal, 31(2), 1988, pp.141-144.
2. Шиканов А.Е. Влияние колебаний Ленгмюра на процесс извлечения ионов из лазерной плазмы. Труды 6-го Международного симпозиума по радиационной плазмодинамике, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2003, с.86-89.
3. Voitenko V.A., Kolomiets N.F., Shikanov A.E. et al. LNT-2M neutron accelerating tube with laser ion source. Instrument and experimental techniques, New York, 1989, 31(5 pt. 1), pp. 1122-1124.
4. Трубка ускорительная лазерная ЛНТ-2М. ТУ 95 1862-88. Внесено в реестр Госкомстандарта СССР 28.07. 1989.
5. Didenko A.N., Shikanov A.E., Rashikov V.I. et al. Generation of nanosecond neutron pulses in vacuum accelerating tubes. Technical Physics, 2014, 59(6), pp. 904-910.

К.Ю. ВАГИН¹, Т.В. МАМОНТОВА^{1,2}, С.А. УРЮПИН^{1,2}

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРОНИКНОВЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМУ, ОБРАЗОВАННУЮ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ ГАЗА

Рассмотрено взаимодействие пробной монохроматической волны с полуограниченной плазмой, образованной в результате многофотонной ионизации атомов газа. Поле в плазме представляется в виде суммы двух вкладов. Аналитические выражения для них получены в условиях высокочастотного и аномального скин-эффектов. Один вклад экспоненциально затухает вглубь плазмы. Другой спадает степенным образом вдали от поверхности плазмы и проявляется в условиях аномального скин-эффекта. Получены аналитические выражения для поверхностного импеданса и коэффициента поглощения.

K. YU. VAGIN¹, T. V. MAMONTOVA^{1,2}, S. A. URYUPIN^{1,2}

¹*P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

MONOCHROMATIC FIELD PENETRATION IN PLASMA FORMED BY MULTIPHOTON GAS IONIZATION

The interaction of a test monochromatic wave with a semi-bounded plasma formed by multiphoton ionization of gas atoms is considered. The plasma field is represented as the sum of two contributions. Analytical expressions are obtained under conditions of high-frequency and anomalous skin effects. One contribution decays exponentially deep into the plasma. The other decreases as a power law and is manifested under the conditions of an anomalous skin effect. Analytical expressions for surface impedance and absorption coefficient are found.

Известно, что проникновение поля существенно зависит от напряженности поля, его спектрального состава и различных характеристик проводящей среды. Одной из таких характеристик является распределение электронов по скоростям. Рассмотрим плазму, образованную при ионизации атомов газа коротким импульсом лазерного излучения. При сравнительно низкой интенсивности ионизирующего излучения распределение фотоэлектронов в плазме состоит из одного энергетического пика, отвечающего поглощению минимально необходимого количества фотонов для преодоления порога ионизации атома. Пренебрегаем разбросом фотоэлектронов по скоростям в пределах энергетического пика и распределение фотоэлектронов аппроксимируем функцией $f(v) = (n/4\pi v_0^2)\delta(v-v_0)$, где n – плотность фотоэлектронов, а v_0 – приобретенная в процессе ионизации скорость фотоэлектронов.

Нами рассмотрено взаимодействие плоской монохроматической электромагнитной волны с фотоионизированной плазмой, занимающей полупространство. Электромагнитное излучение падает по нормали к поверхности плазмы. Считается, что частота пробной волны ω меньше плазменной ω_L , а столкновения электронов слабо влияют на сравнительно быстрые движения фотоэлектронов во внешнем периодическом поле. Установлено, что глубина проникновения поля в плазму в широком диапазоне частот меняется слабо и определяется электромагнитным масштабом c/ω_L . Однако при приближении ω к нулю или к ω_L глубина резко возрастает.

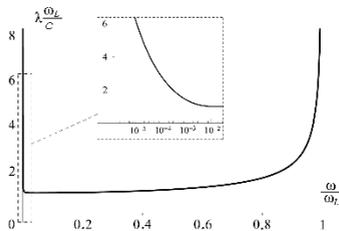


Рис.1. Зависимость эффективной глубины проникновения поля от частоты.

Поле в плазме представляется в виде двух вкладов, которые найдены аналитически для больших и малых значений параметра $v_0\omega_L/c\omega$. Первый из этих вкладов монотонно затухает вглубь плазмы по экспоненциальному закону. Второй вклад осциллирует в пространстве и убывает вглубь плазмы по иному закону. В пределе $v_0\omega_L/c\omega \ll 1$, когда роль пространственной дисперсии мала, поле в плазме определяется первым вкладом. При этом абсолютная величина поля в плазме вблизи ее границы увеличивается с частотой падающей волны. В случае $v_0\omega_L/c\omega \gg 1$ пространственная дисперсия диэлектрической проницаемости, обусловленная движением фотоэлектронов, определяет характер проникновения поля. В этом случае у границы плазмы оба вклада в поле сравнимы по величине, однако на масштабах, превышающих глубину скин-слоя, поле определяется вторым вкладом и убывает по степенному закону $\sim z^{-2}$. В широком диапазоне частот доля энергии падающей волны, поглощаемая плазмой, мала по сравнению с энергией отраженной волны.

А.С. ПОЛЮХИН

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР И ПЛОТНОСТЕЙ

В данной работе представлен алгоритм определения основных термодинамических свойств плазмы, находящейся в внешнем магнитном поле на основе модели Томаса-Ферми с учетом квантово-обменных поправок на примере серебра. Результаты работы, составленной разностной схемой, по вычислению краевой задачи на потенциал Томаса-Ферми и соответствующую поправку были проведены для различных веществ, тем самым верифицирую расчеты. Определяемые с помощью представленной схемы термодинамические параметры могут быть в дальнейшем использованы при решении различных задач управляемого термоядерного синтеза в широком диапазоне температур и плотностей.

A.S POLYUHIN

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

NUMERICAL MODELLING OF THE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF A MAGNETIZED PLASMA IN A WIDE RANGE OF TEMPERATURES AND DENSITIES

This paper presents an algorithm for determining the basic thermodynamic properties of a plasma in an external magnetic field for silver based on the Thomas-Fermi model with quantum-exchange corrections considered. The results of the work of obtained difference scheme for calculating the boundary value problem on the Thomas-Fermi potential and the corresponding correction were carried out for various substances, thus verifying the calculations. The thermodynamic parameters determined using the presented scheme can be further used in solving various problems of controlled thermonuclear fusion in a wide range of temperatures and densities.

В работе представлен алгоритм по определению основных термодинамических свойств плазмы в внешнем магнитном поле. В качестве основной физической модели используется модель Томаса-Ферми с квантово-обменными поправками [1]. Существующий численный алгоритм классической модели [2-4] был улучшен за счет добавления в исходную систему уравнения, определяющего квантово-обменную поправку. Решения полученной краевой задачи позволяет определять основные термодинамические свойства системы в широком диапазоне температур и плотностей за счет нахождения электрического потенциала Томаса-Ферми из относительно простой системы линейных уравнений.

Основной целью работы является расширение области применения классической модели Томаса-Ферми за счет введения квантово-обменных поправок, а также учета внешнего магнитного поля. Такая модель позволяет с хорошей точностью вычислять все необходимые термодинамические свойства системы высокотемпературной сжатой плазмы ($T > 10^4$ К, $\rho > 1$ г/см³) [5-6].

Для верификации разработанного численного метода были построены кривые распределения потенциала и соответствующей квантово-обменной поправки в ячейке, кроме того, были продемонстрированы диаграммы влияния поправки на основные термодинамические параметры системы при различных температурах и плотностях. Учет воздействия внешнего магнитного поля позволяет обобщить полученные в данной работе результаты на область управляемого термоядерного синтеза, в котором при решении уравнений плазмодинамики необходимо вычислять зависимости термодинамических свойств плазмы от температуры и плотности [7-12].

Список литературы

1. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы и методы расчёта росселандовых пробегов и уравнений состояния. М.: Физматлит, 2000. 21 с.
2. Кузенов В.В., Шумаев В.В. // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 32-36.
3. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Shumaev V.V. // High Temperature Material Processes. 2014. V. 18. Issue 1-2. P. 99-109.
4. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Шумаев В.В. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 22-25.
5. S. Dyachkov, P. Levashov, // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. no. 5. 052702.
6. N. N. Kalitkin and K. I. Lutskiy, Math. Model. Comput. Simul. 2015. V. 27:4. pp. 518–530.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 830. P. 012049.
8. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Journal of Phys.: Conf. Series. 2017. V. 815. P. 012024.
9. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Shumaev V. V. // Problems of Atomic Science and Technology. 2015. No. 1 (95). P. 97-99.
10. 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.
11. Ryzhkov S.V. // Sustainable Cities and Society. 2015. V. 14. P. 313–315.
12. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.

А.М. ЖУКЕШОВ, Б.М. ИБРАЕВ, М.И. ПШИКОВ

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

РАЗРАБОТКА ПЛАЗМЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Рассмотрены вопросы генерации мощных импульсных плазменных потоков и приведены параметры потока для ускорителей КПУ-30 и ПФ-30, разработанных в НИИЭТФ КазНУ им. аль-Фараби.

А.М. ZHUKESHOV, В.М. IBRAEV, М.И. PSHIKOV

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

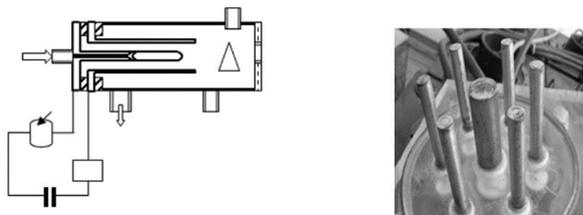
DEVELOPMENT OF PLASMA PULSERS

This study explored processes of generation of high-powered intensive pulsed plasma flows and presented flow parameters for Coaxial Plasma (CPA-30) and Plasma Focus (PF-30) accelerators, which were developed in Science and Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, Kazakh National University after Al-Farabi.

Проблема совершенствования технологических методов упрочнения конструкционных материалов, в том числе наноразмерная структурная модификация, является весьма актуальной. Как известно, обработка импульсными потоками плазмы обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными технологическими процессами термической и химико-термической обработок, и с методами воздействия, основанными на использовании других видов концентрированных потоков энергии, например лазерного.

В экспериментах для получения плазменных потоков высокой интенсивности использовался импульсный плазменный ускоритель с коаксиальной системой электродов (КПУ). Это тип ускорителя, первоначально созданный для целей термоядерного синтеза, впоследствии успешно применялся в обработке материалов. Ускоритель КПУ подробно описан в [1], поэтому изложим наиболее важные характеристики этого устройства. Для данного устройства возможны два режима работы, в зависимости созданных для разряда газа условий. Первый – режим с импульсным напуском газа, при котором регулируется время задержки между моментами запуска газа и подачи высокого напряжения на электроды. В данном режиме вариацией задержки возможно получение очень горячих, но неоднородных сгустков плазмы. Регулирование плотности энергии плазменного сгустка в определенных пределах возможно управлением напряжением зарядки батарей. Второй режим – с предварительным наполнением рабочей камеры газом до давления, при котором возможен его пробой. В этом режиме регулированием давления возможно получение сгустков с энергией и скоростью в широком диапазоне. В обоих режимах плотность

энергии плазменного потока находится в диапазоне 5-60 Дж/см². В режиме с импульсным напуском, при малых временах задержки имеет место эрозия дуги электродов, когда ионы и нейтралы материала электрода присутствуют в плазме. Диаметры внешнего и внутреннего электродов КПУ-30 были 90 и 24 мм соответственно. Высоковольтный импульс, прикладываемый на электроды, получали от емкостного накопителя энергией от 3 до 30 кДж. На расстоянии более 15 см от конца электродов получена однородность плазменных потоков 20-30 %. С точки зрения технологического режима, на таких ускорителях возможны два варианта технологии: 1-режим с плазменной обработкой и 2-режим с напылением.



а б

Рис.1. Схема ускорителя КПУ-30 (а) и электроды ускорителя ПФ-30(б)

Для развития дальнейших исследований по плазменной обработке с применением плазменных ускорителей, разработан ускоритель с геометрией электродов типа «плазменный фокус» (ПФ-30). По существу, он имеет те же параметры что и КПУ-30, однако особая геометрия электродов, позволяет получать в точке фокуса более высокую концентрацию энергии. Экспериментальные исследования показали, что с данной системой электродов достигается плотность энергии потока до 250 Дж/ см², что в четыре раза выше чем на КПУ-30. На установках типа ПФ эрозия поверхности центрального электрода - это распыление, которое может быть использовано для осаждения пленок, т.е. напыления.

Список литературы

1. А. М. Zhukeshov, Plasma flow formation in a pulse plasma accelerator in continuous filling regime // Plasma devices and Operations..17, No. 1. – P. 74-79. – 2009.

А.М. ЖУКЕШОВ, Б.М. ИБРАЕВ, М.И. ПШИКОВ

Казахский национальный университет им.аль-Фараби, Алматы, Казахстан

МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ УСКОРИТЕЛЯМИ

Обсуждаются результаты модификации материалов с применением плазменного ускорителя с коаксиальной геометрией электродов и перспективы использования геометрии «плазменный фокус» для получения импульсных плазменных потоков как эффективного инструмента в материаловедении, в том числе в нанотехнологии.

A.M. ZHUKESHOV, B.M. IBRAEV, M.I. PSHIKOV

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

MODIFICATION OF MATERIALS USING PLASMA FLOWS GENERATED BY PULSED ACCELERATORS

The research discussed the results of material modification using plasma accelerator with coaxial shape of electrodes and perspective use of “plasma focus” shape for achieving pulsed plasma flows as an effective tool in material science, including nanotechnology.

В последнее время можно наблюдать возрастающий интерес к методу модификации поверхностных свойств различных материалов с применением импульсных ионных пучков высокой интенсивности. Значительная часть наших исследований посвящена изучению обработке сталей импульсами азотной плазмы на установке КПУ-30 с коаксиальной формой электродов [1]. Показано, что высокие дозы азота (порядка 10^{17} см⁻²) могут быть внедрены в сталь, используя импульсы азотной плазмы с плотностью потока энергии 20-25 Дж/см². Как показал спектральный анализ, такие высокие дозы могут быть внедрены при использовании 3-5 импульсов обработки. Обработка велась азотной плазмой с различным количеством импульсов воздействия (от 5 до 30). Было показано, что с ростом количества обработок наблюдается уширение линий аустенита, а содержание нитридной фазы растет. Причина изменения структуры обработанной стали может заключаться в быстром остывании поверхностного слоя и формировании модифицированной структуры, состоящей как из наноразмерных кристаллитов новых фаз, так и квазиаморфной. Введенные концентрации азота близки или даже превышают предел, достижимый после длительной ионной имплантации. В любом случае это приводит к увеличению микротвердости (фактически, в 2-5 раз для различных марок конструкционной стали). Значительное увеличение микротвердости и поверхностной стойкости для сталей различных марок, связывается с формированием нитридной фазы при обработке импульсной плазмой. Увеличение микротвердости и формирование наноразмерной структуры должно приводить к увеличению сопротивления износа. В нашем случае, для

конструкционных сталей, обработанных 3-5 импульсами азота, коэффициент износостойкости увеличивался до 4 раз соответственно.

Получены первые результаты исследований на плазменном ускорителе с геометрией электродов типа «плазменный фокус» (ПФ-30). Особая геометрия электродов, позволяет получать в точке фокуса более высокую концентрацию энергии. Была достигнута плотность энергии потока до 250 Дж/см^2 , что в четыре раза выше чем на КПУ-30. На установках типа ПФ эрозия поверхности центрального электрода - это распыление, которое может быть использовано для осаждения пленок, т.е. напыления. Изучены как эрозия электродной системы в целом, так и особенности напыления конкретных материалов. Картина эрозии поверхности электродной системы после ряда выстрелов показывает, что эрозии подверглась в основном торцевая часть центрального электрода, что свидетельствует об контрагировании разряда на поверхности анода. В то же время, заметной эрозии боковой части электрода не наблюдалось, что дает основания полагать о резком броске тока от основания электрода к его центральной части. При сравнении данной системы с коаксиальной системой обнаружено, что при равном значении тока в системе фокуса разряд не оставляет следов эрозии по боковой поверхности электрода. Высокая плотность энергии в плазменном фокусе позволяет более эффективно воздействовать на поверхность материала при обработке, а концентрация плазмы в малой области в точке фокуса - увеличить коэффициент распыления. С этой точки зрения открываются перспективы применения установки ПФ в технологии наноматериалов.

Список литературы

1. Zhukeshov A.M., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., S.P. Pak. Structure and microhardness of steel samples after pulse plasma flows processing // *Materials Sciences and Applications*: - 2013. №4. P.35-41.

Е.Д. ВОВЧЕНКО, О.В. ДЕРЯБОЧКИН, К.И. КОЗЛОВСКИЙ,
А.Е. ШИКАНОВ,

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ КОРОТКИХ ПАКЕТОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НУКЛИДОВ ВОДОРОДА

Рассмотрены возможные схемы формирования коротких пакетов высокоэнергетичных нуклидов водорода, использующие высоковольтные ГИН с разрядником-обострителем, СВЧ клистронные группирователи, лазерную плазму, «обращенные диоды» с коллективным ускорением, устройства с «плазменным фокусом». Обсуждаются возможности их использования для генерации интенсивных импульсных нейтронных потоков с длительностью $\sim (10 - 10^2)$ нс.

K.I. KOZLOWSKII, E.D. VOVCHENKO, A.E. SHIKANOV, O.V.
DERYABOCHKIN

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

SMALL- SIZE PLASMA GENERATORS OF SHORT HIGH ENERGY HYDROGEN NUCLEUS PACKAGES

Possible schemes of formation of short packets of high-energy hydrogen nuclides that use high-voltage generators with spark gap for sharpen a pulse, microwave klystron buncher, laser plasma, "reverse diodes" with collective acceleration, and devices with "plasma focus" are considered. The possibilities of their use for the generation of intense pulsed neutron fluxes with a duration of $\sim (10-10^2)$ ns are discussed.

Для эффективной реализации ряда новых ядерных технологий требуются малогабаритные нейтронные генераторы, работающие в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса $\sim (10 - 10^2)$ нс [1]. Такие режимы генерации нейтронов могут быть обеспечены при использовании соответствующих схем формирования коротких пакетов высокоэнергетичных нуклидов водорода, рассмотренных ниже.

Первая схема подразумевает формирование на диодном зазоре ускорительной трубки (УТ) короткого высоковольтного импульса с помощью генератора импульсного напряжения (ГИН), соединенного с диодной системой УТ через разрядник-обостритель [1].

Вторая схема предполагает использование лазерной плазмы, содержащей дейтерий, и ГИН, но без обострителя. В этом случае, за счет подбора, геометрии УТ, параметров ГИН и задержки высоковольтного импульса относительно запуска лазера, работающего в режиме модулированной добротности,

обеспечивается полное извлечение дейтронов из плазмы ионного источника за времена $\sim (10 - 10^2)$ нс [2].

Третья схема предполагает последовательное расположение на трассе потока нуклидов водорода, извлекаемого из ионного источника, высокочастотного дефлектора с коллиматором и клистронного группирователя [3], что обеспечивает компрессию ионного потока.

Четвертая схема использует эффект коллективного ускорения дейтронов импульсом электронов в обращенном диоде. Схема была экспериментально исследована в НИЯУ МИФИ [4]. В эксперименте ускоряющий электроны импульс напряжения с амплитудой 200кВ и длительностью $(10 - 10^2)$ нс формировался с использованием линии Блюмляйна, в которой запасалась энергия ~ 100 Дж. Кинетическая энергия ускоренных дейтронов достигала 1 МэВ, что позволяло для генерации нейтронов использовать металло-дейтериевые и бериллиевые мишени.

Пятая схема предполагает использование в качестве плазменного источника импульсную электродинамическую систему с плазменным фокусом (ПФ) [5], образуемом при пробое по поверхности диэлектрика в камере, содержащей изотопы тяжелого водорода, с образованием токового плазменного слоя, на который действуют силы Ампера со стороны собственного магнитного поля, сжимающие и ускоряющие плазменный поток. Для получения требуемых нейтронных характеристик необходимо, чтобы энергия, закачиваемая в разряд от емкостного накопителя, составляла величину \sim единиц кДж.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 05.605.21.0182 (RFMEFI60519X0182).

Список литературы

1. Didenko A.N., Shikanov A.E., Rashchikov V.I. et al. Generation of nanosecond neutron pulses in vacuum accelerating tubes. *Technical Physics*, 2014, 59(6), pp. 904-910.
2. Dydychkin V.N., Shikanov A.E. Generation of short (<100 ns) neutron pulses in small accelerator tubes with a laser-operated ion source. *Atomic Energy*, 1991, 70(2), pp.181-183.
3. Hahto S.K., Hahto S.T., Leung K.N. et al. Fast ion beam chopping system for neutron generators. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005. V. 76(2), 023304 – 023304-5. <https://doi.org/10.1063/1.1852871>
4. Kozlovsky K.I., Ryzhkov V.I., Tsybin A.S., Shikanov A.E. Experimental study of a model of a neutron generator based on a diode with collective acceleration of deuteron by a pulsed electron beam. *Atomic Energy*, 2012, 113(2), pp.148 – 151.
5. Боголюбов Е.П., Лемешко Б.Д., Рыжков В.И., Самарин В.А. Импульсные нейтронные генераторы ВНИИА на основе камер плазменного фокуса. Сб. материалов Межотраслевой научно-технической конференции "Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе", 2003, ВНИИА им. Н.И. Духова, Москва, Россия, с. 77 – 81.

А.М. БУЛЫГИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, О.В. ДЕРЯБОЧКИН, А.Р.
КАРИМОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.Е. ШИКАНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ

ПРОЕКТ МАЛОГАБАРИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПЛАЗМЫ

Предложен проект малогабаритного импульсного ускорителя плазмы. Ускорение плазмы осуществляется при взаимодействии азимутального электрического тока, создаваемого аксиальным нестационарным магнитным полем, с постоянным радиальным магнитным полем, формируемым в специальной магнитной системе с T-образным сердечником. Приводятся оценки темпа ускорения на примере дейтериевой плазмы.

A.M. BULYGIN, E.D. VOVCHENKO, O.V. DERYABOCHKIN,
A.R. KARIMOV, K.I. KOZLOWSKII, A.E. SHIKANOV

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

PROJECT OF SMALL-SIZED, PULSE PLASMA ACCELERATOR

A project of small-sized, pulse plasma accelerator is proposed. The acceleration effect is caused by the interaction of an azimuthal electric current created by an axial non-stationary magnetic field with a constant radial magnetic field, which is formed by a special magnetic system with a T-shaped core. An estimate of the acceleration rate for a deuterium plasma is derived.

Предлагается проект малогабаритного импульсного плазменного ускорителя (ПУ), реализующий техническое решение [1–3]. Его схематический разрез представлен на рис. 1.

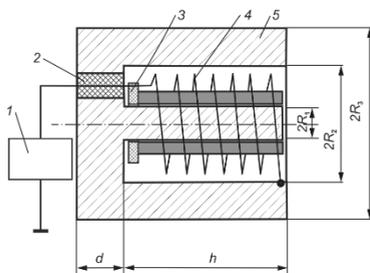


Рис.1. Схематический разрез плазменного ускорителя: 1-генератор импульсов тока [4], 2-высоковольтный ввод, 3- диэлектрическая шайба, 4- спиральный электрод, 5- магнитопровод

При срабатывании генератора импульсов тока (ГИТ) в спирали нарастает электрический ток, создающей переменное продольное магнитное поле. Одновременно в рабочей полости ПУ между спиралью и центральным участком магнитопровода возникает переменное азимутальное электрическое поле,

вызывающее разряд по внутренней поверхности диэлектрической шайбы с образованием плазменного облака, в котором возбуждается азимутальный электрический ток. Плотность тока можно аппроксимировать следующей приближенной зависимостью:

$$j(r, t) \approx \mu \sigma \frac{R_1^2}{2rh} NU \sqrt{\frac{C}{L}} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \left[\frac{R}{2L} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) - \frac{1}{\sqrt{LC}} \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \right],$$

где μ – магнитная проницаемость магнитопровода, σ – проводимость плазмы, U – ударное напряжение ГИТ, C – ударная емкость ГИТ, R – сопротивление разрядной цепи, L – индуктивность ПУ, N – число витков спирали, t – время, r – радиальная цилиндрическая координата.

Магнитная система ускорителя позволяет сформировать в полости постоянное магнитное поле с радиальной составляющей вектора индукции, определяемой следующим приближенным выражением:

$$B_r(r, z) \approx B_0 \frac{R_1}{h} \left[R_1 \ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{1}{2\mu} \left(\frac{h^2 R_1}{R_2^2 - R_3^2} + \frac{4R_1 h}{3d} + \frac{h^2}{R_1} \right) \Gamma^{-1} \frac{z}{r} \right],$$

где z – координата, откладываемая вдоль оси симметрии ускорителя от левого торца его рабочей полости, $B_0 = B_r[0.5(R_3 + R_2), 0]$.

Процесс ускорения рассматривается в МГД приближении при постоянной плотности плазмы ρ :

$$\begin{cases} \rho \frac{dV}{dt} = j(z, t) B_r[0.5(R_1 + R_2), z], \\ \frac{dz}{dt} = V, \end{cases}$$

где V – скорость плазмы, с начальными условиями $z(0) = 0$, $V(0) = 0$.

Компьютерный анализ показал возможность достижения темпа ускорения дейтронов в ПУ \sim МэВ/м при максимальных линейных размерах устройства \sim 0.1м, что говорит о реальности его применения в качестве эффективного малогабаритного генератора нейтронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по соглашению № 05.605.21.0182 (RFMEFI60519X0182).

Список литературы

1. Karimov A.R., Terekhov S.A., Shikanov A.E., Murad P.A. Acceleration of Macroscopic Clusters in Crossed Magnetic Fields/ IEEE TPS. 2019. V.47, pp.1520–1525.

2. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I., Shatokhin V.I. Model of Laser Plasma Acceleration in the Field of a Spiral Electrodynamical Line / *Technical Physics Letters*, 2019, vol.45, No. 2, pp 119–122.

3. Вовченко Е.Д., Каримов А.Р., Козловский К.И. и др. Плазменный ускоритель. Патент РФ №2696975, приоритет от 07.12.2018.

4. Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I., Shikanov A.E. et al. An accelerating voltage generator for pulsed neutron sources / *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, 60(3), pp. 362–366.

А.С. ВОРОНОВ¹, И.Д. ЕГОРОВ^{1,2}

¹ЗАО «СуперОкс», Москва, Россия;

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКЕ

Рассмотрены результаты применения высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения производства ЗАО «СуперОкс» для изготовления внешней магнитной системы магнитоплазодинамических ракетных двигателей.

A.S. VORONOV¹, I.D. EGOROV^{1,2}

¹SuperOx company, Moscow, Russia; ²National Research Nuclear University MEPhI,
Moscow, Russia

SUPERCONDUCTING TECHNOLOGIES FOR APPLICATION IN ELECTRIC ROCKET THRUSTERS

The application results of the 2G-HTS tapes produced by CJSC «SuperOx» for the manufacturing of an external magnetic system of magnetoplasmadynamic thrusters are considered.

Хорошо известно, что эффективность работы и ресурс магнитоплазодинамических (МПД) двигателей можно существенно повысить за счёт использования внешней магнитной системы [1]. Однако, на создание внешнего магнитного поля с помощью традиционных медных магнитных катушек может тратиться в несколько раз больше энергии, чем непосредственно на работу самого двигателя [2]. Проблема может быть решена за счёт использования магнитной системы на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Так, если на создание внешнего магнитного поля 0,4 Тл с помощью традиционного электромагнита тратится 270 кВт [2], то на поддержание такого же поля в прототипе МПД двигателя с внешней магнитной системой разработки компании «СуперОкс» расходуется менее 1 кВт электрической мощности.

Результатом применения внешней магнитной системы на основе ВТСП в МПД двигателе стала возможность достижения КПД более 50% при работе на аргоне и потребляемой мощности до 20 кВт включительно. Ранее столь высокая эффективность достигалась только при работе МПД двигателей на литии в качестве рабочего тела и потребляемой мощности на уровне 100 кВт или более (МПД двигатели наиболее эффективны при больших мощностях). При этом тяга двигателя достигала 0,55 Н, а удельный импульс – 35 км/с.

В пределах внешних магнитных полей 0,1...0,4 Тл наблюдается тенденция к монотонному повышению эффективности работы двигателя. Рост внешнего магнитного поля сопровождается ростом напряжения на электродах двигателя, что позволяет при сохранении мощности снизить разрядный ток. Так, например, при стабильной мощности разряда 14,8 кВт повышение внешнего магнитного поля с 0,1 до 0,4 Тл сопровождалось снижением разрядного тока с 460 до 380 А при одновременном росте тяги с 373 до 415 мН. Снижение разрядного тока приводит к снижению нагрузки на электроды двигателя и, соответственно, увеличению его ресурса. Малый ресурс МПД двигателей ранее был одной из главных их проблем на пути их практического использования.

ВТСП ленты второго поколения, отличающиеся высокой стойкостью к магнитным полям, а потому являющиеся хорошими кандидатами для создания мощных магнитных систем, являются на данный момент массово выпускаемой серийной продукцией. Полный цикл производства данных лент развёрнут в Москве, что позволяет гарантировать своевременную поставку любым российским и зарубежным организациям.

Список литературы

1. Magnetoplasmadynamic Thrusters, Mariano Andrenucci// Encyclopedia of Aerospace Engineering edited by Richard Blockley and Wei Shyy, 2010
2. 100-kW Steady State AF-MPDT Experimental Investigation, Georg Herdrich// EPIC Lecture Series, London, 18.10.2018

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.Е. ЕВСИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ПУТЕМ СОСАЖДЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ

В работе проанализированы методы создания высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2) путем соосаждения отдельных компонентов. Сделан вывод, что наиболее перспективным является последовательное осаждение аморфной пленки в вакууме и ее кристаллизация через жидкую фазу в кислороде. Усовершенствование конструктивной реализации данного метода по сравнению с существующими аналогами позволит создать технологию производства ВТСП-2, приемлемую для широкого промышленного внедрения.

L.B. BEGRAMBEKOV, A.E. EVSIN

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

METHODS OF MANUFACTURE OF SECOND-GENERATION HIGH- TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS BY CO-DEPOSITION OF THE COMPONENTS

Methods of manufacture of second-generation high-temperature superconductors (2G HTS) by co-deposition of the components are analyzed. It is concluded that the most perspective method consists of consequent deposition of amorphous film in vacuum and its crystallization through the liquid phase in gaseous oxygen. Upgrade of the constructive implementation of this method in comparison with existing analogues will provide the industry applicable technology of manufacture of 2G HTS.

В настоящее время в России и за рубежом имеется несколько технологий изготовления ленточных высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения (ВТСП-2) на основе ReBCO (Re – редкоземельный элемент, В – барий, С – медь, О – кислород). Все они отличаются высокой себестоимостью продукции (250 – 400 долларов за $\text{кА}\cdot\text{м}$), что является препятствием для применения сверхпроводников в технике. В связи с этим имеется необходимость в разработке принципиально новой технологии, обеспечивающей кардинальное снижение себестоимости сверхпроводника.

Основой такой технологии может стать метод получения слоя ReBCO путем соосаждения отдельных компонентов в аморфную пленку и последующего отжига пленки в кислороде для роста структуры ReBCO и при-дания пленке сверхпроводящих свойств. Первые попытки получения пленок ReBCO данным методом предпринимались достаточно давно, однако оказались неудачными [1]. Причинами тому были сегрегация вторичных фаз и наличие случайно

ориентированных ReBCO-зерен в пленке после кристаллизации, что приводило к низким сверхпроводящим свойствам пленок. Для преодоления данных проблем стали разрабатываться способы *in situ* кристаллизации пленок с подогревом подложки и введением кислорода в процессе роста пленки. Однако для реализации такой процедуры требовалось большое давление кислорода, что препятствовало организации стабильного и высокоскоростного процесса осаждения. Поэтому была придумана схема с пространственным разделением области напыления и области оксидирования. Процесс назвали RCE-CDR (reactive co-evaporation by cyclic deposition and reaction). В нем осаждение пленки в вакууме чередовалось с ее оксидированием в области повышенного давления кислорода. Пленки, полученные методом RCE-CDR, были высокого качества, однако системы, требуемые для реализации данного процесса, оказались весьма сложными, а сам процесс трудно масштабировать для промышленного применения [2]. Данные недостатки были устранены в методе, предложенном фирмой SuNAM, вновь обратившейся к идее *ex situ* кристаллизации ReBCO, когда вначале при низком давлении кислорода осаждается аморфное прекурсорное покрытие из компонентов, а затем производится его кристаллизационный отжиг в кислородной печи [3]. Оказалось, что если процесс кристаллизации аморфной пленки осуществляется через жидкую фазу, то в результате за короткое время (<1 мин) получается хорошо текстурированная пленка ReBCO с необходимой стехиометрией. Процесс получил название RCE-DR (reactive co-evaporation by deposition and reaction). Реализовать данный процесс значительно проще, чем RCE-CDR. С его помощью в фирме SuNAM были произведены ленты с высокими значениями критического тока (>5 MA/cm² на GdBCO) и с высокой скоростью (120 м/ч). Тем не менее, реализация метода RCE-DR фирмой SuNAM с использованием электронно-лучевых испарителей, расположенных на большом (>10 см) расстоянии от подложки, представляется неоптимальной. Усовершенствование конструктивной реализации данного метода позволит, в конечном счете, создать технологию производства ВТСП-2, приемлемую для широкого промышленного внедрения.

Список литературы

1. R.B. Laibowitz, et al. // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 35, № 16, P. 8821–8823.
2. V. Matias et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2009. Vol. 19, № 3, P. 3172-3175.
3. S.S. Oh, et al. // Progr. Supercond. Cryogen. 2013. Vol. 15, № 4, P. 1-5.

А.Е. ЕВСИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, Э.М. ГЛАГОВСКИЙ,
А.Н. ВОЙТЮК, А.М. ЗАХАРОВ, Я.А. САДОВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

НАПРАВЛЕННОЕ ОСАЖДЕНИЯ ПАРОВ МЕТАЛЛОВ КАК МЕТОД УСКОРЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ АМОРФНОГО СЛОЯ КОМПОНЕНТОВ ВТСП-2

В работе показаны преимущества использования направленного осаждения паров металлов, по сравнению с электронно-лучевым испарением, при создании сверхпроводящего слоя ReBCO. Проведены предварительные эксперименты по направленному осаждению паров меди и иттрия, подтверждающие возможность достижения необходимой скорости осаждения, высокой степени направленности потоков паров и чистоты осажденных пленок.

A.E. EVSIN, L.B. BEGRAMBEKOV, E.M. GLAGOVSKIY,
A.N. VOITYUK, A.M. ZAKHAROV, Y.A. SADOVSKIY

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

DIRECTIONAL DEPOSITION OF METALS VAPOR AS A METHOD OF ACCELERATED FORMATION OF AMORHOUS LAYER OF 2G HTS COMPONENTS

The advantages of directional deposition of metals vapor in comparison with e-beam evaporation for formation of superconducting ReBCO layer are demonstrated. Preliminary experiments on directional deposition of copper and yttrium have revealed the attainability of necessary deposition rates, high degree of the directivity of vapor fluxes as well as high purity of the deposited films.

Одна из наиболее активно разрабатываемых на сегодняшний день технологий создания высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения (ВТСП-2) на основе ReBCO (Re – редкоземельный элемент, В – барий, С – медь, О – кислород) базируется на предложенном фирмой SuNAM методе получения сверхпроводящего слоя, получившем название RCE-DR (reactive co-evaporation by deposition and reaction) [1]. Метод состоит из двух стадий: напыления аморфного слоя из компонентов ReBCO и его последующей направленной кристаллизации. Аморфный слой формируется за счет электронно-лучевого испарения каждого компонента из своего тигля и осаждения паров на движущуюся ленту с предварительно нанесенными на нее буферными слоями при температуре 870 °С и давлении кислорода $\sim 10^{-5}$ Торр. Затем, лента с осажденным аморфным слоем пропускается сквозь двухкамерную кислородную печь, в результате чего получается текстурированная пленка ReBCO необходимой стехиометрии.

Основное достоинство метода RCE-DR заключается в его высокой производительности (≈ 120 м/ч). Однако реализация метода фирмой SuNAM не позволяет в полной мере использовать его потенциал и достигнуть приемлемой для широкого промышленного внедрения цены ВТСП-2 проводника в 50 \$ за кА·м. Вследствие необходимости расположения электронно-лучевых испарителей в нескольких десятках сантиметров от ленты снижается скорость осаждения компонентов на ленту. При этом значительная часть испаренных атомов осажается на окружающие конструкционные элементы и стенки напылительной камеры, что приводит к необходимости их периодической очистки от пленок, фрагменты которых со временем отшелушиваются и оседают на движущуюся ленту. В результате таких перерывов в работе, реальная скорость производства сверхпроводящего слоя оказывается значительно меньше 120 м/ч.

Перечисленные недостатки могут быть устранены, если вместо электронно-лучевого испарения использовать метод направленного осаждения паров металлов. В этом методе слой формируется потоками паров компонентов из трёх источников, включающих тигель с узким соплом и резистивный нагреватель, окружённые водяной рубашкой. Источники паров имеют малые размеры, располагаются в непосредственной близости друг к другу и к движущейся ленте, и формируют потоки паров, узконаправленные в одну и ту же область ленты. В результате, обеспечивается однородность состава пленки, при том, что коэффициент использования материала мишеней становится близким к единице, и осаждение материала на стенки камеры сводится к минимуму. Таким образом, количество технологических перерывов в работе испарителей резко уменьшится, и производительность процесса вырастет в несколько раз.

Предварительные эксперименты по направленному осаждению паров меди и иттрия, проведенные на специально разработанном экспериментальном стенде, показали принципиальную возможность нанесения слоев данных элементов со скоростью, обеспечивающей скорость производства сверхпроводящей ленты >120 м/ч. При этом была достигнута высокая степень направленности потоков паров и высокая чистота формируемого слоя (концентрация примесей <0.2 ат. %).

Список литературы

1. S.S. Oh, et al. // Progr. Supercond. Cryogen. 2013. Vol. 15, № 4, P. 1-5.

А.Е. ЕВСИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, Г.П. ТИМКОВСКИЙ,
И.Д. ЖДАНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ОКСИДИРОВАНИЯ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В работе исследовалось влияние плазменного облучения на процесс оксидирования сплавов Zr-Nb и Zr-Nb-Sn. Показано, что под воздействием плазмы оксидирование сплавов ускоряется в результате возникновения в оксидном слое электрического поля от поверхностного отрицательного заряда, приобретенного в плазме. С ростом температуры образца и при наличии олова в сплаве ускоряющий эффект уменьшается, предположительно, из-за увеличения проводимости оксидного слоя.

A.E. EVSIN, L.B. BEGRAMBEKOV, G.P. TIMKOVSKIY,
I.D. ZHDANOV

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

EFFECT OF PLASMA IRRADIATION ON THE OXIDATION OF ZIRCONIUM ALLOYS

The effect of plasma irradiation on the oxidation of Zr-Nb and Zr-Nb-Sn alloys is investigated. It is shown that under plasma irradiation the oxidation of alloys accelerates due to electric field in the oxide layer induced by negative surface charge acquired in plasma. The accelerating effect reduces with increasing sample temperature and in the presence of tin in the alloy, presumably, due to increased conductivity of the oxide layer.

Циркониевые компоненты активных зон легководных реакторов корродируют под воздействием воды и продуктов ее радиолиза. Традиционные испытания коррозионной стойкости циркониевых сплавов заключаются в выдержке образцов в высокотемпературной воде или паре, требуют тысяч часов и не включают в себя воздействие возбужденных и ионизованных частиц, рождающихся при радиолизе воды. Такие частицы содержит в себе кислородосодержащая плазма, причем в большем количестве, чем среда активной зоны реактора, так что поверхностные реакции, инициирующие рост оксидной пленки на цирконии, в плазме происходят интенсивнее. В связи с этим, плазменное оксидирование представляет интерес в качестве возможной основы метода ускоренных коррозионных испытаний циркониевых сплавов. В работе исследуется влияние параметров плазменного облучения на оксидирование сплавов Zr-Nb и Zr-Nb-Sn.

Образцы сплавов выдерживались в плазме Ar+25%O₂ разряда с накальным катодом при давлении рабочего газа $1 \cdot 10^{-3}$ Торр, плотностях потока ионов на образцы $\sim 10^{15} - 10^{16}$ см⁻²с⁻¹, температурах 360°C и 600°C в течение 20 – 1800 мин.

Образцы заземлялись, а катод и анод до зажигания разряда не имели гальванической связи с землей. Для сравнения часть образцов выдерживалась в газе того же состава, при том же давлении и температуре. Каждый образец до и после эксперимента взвешивался на микровесах AND BM-20. По разности масс определялся коррозионный привес.

Эксперименты показали, что временные зависимости коррозионного привеса образцов обоих сплавов при любых условиях оксидирования имеют вид $\Delta m = A \cdot t^{1/n}$, где $n = 1.5 \div 2.5$. Это означает, что диффузия кислорода в облучаемые образцы определяла скорость роста оксидной пленки. Оксидирование сплава Zr-Nb в плазме при $T = 360^\circ\text{C}$ и $j = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ происходило в несколько раз быстрее, чем в газе, в то время как для сплава Zr-Nb-Sn влияние плазменного облучения при тех же параметрах оказалось значительно меньше. При температуре образцов 600°C скорости оксидирования сплавов в плазме и в газе сравнивались. С увеличением плотности потока ионов при фиксированном времени облучения скорость оксидирования сплавов возрастала и при $j \approx 1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ выходила на плато.

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать вывод, что основной причиной ускорения оксидирования циркониевых сплавов при плазменном воздействии является возникновение электрического поля в оксидном слое за счет появления на оксидированной поверхности отрицательного заряда относительно металлического образца. Диффузия кислорода в оксиде циркония происходит путем перескока ионов O^{2-} по анионным вакансиям, поэтому поле отрицательного поверхностного заряда ускоряет транспорт кислорода в глубину. Уменьшение ускоряющего эффекта с ростом температуры сплава и при наличии олова в его составе, по-видимому, вызвано увеличением проводимости оксидного слоя, позволяющей стекать части поверхностного заряда, приобретенного в плазме. В первом случае из-за интенсивного растворения кислорода в металле при температуре 600°C растущий оксидный слой существенно обеднен кислородом, что может являться причиной его повышенной проводимости [1]. Во втором случае проводимость оксидного слоя может увеличиваться из-за наличия слабо окисленных включений олова, сегрегировавшего на границы зерен в процессе роста оксида [2].

Список литературы

1. D.A. Siegel, et al. // Phys. Rev. B. 2015. Vol. 92, art. no. 125421.
2. G. Sundell, et al. // J. Nucl. Mater. 2015. Vol. 456, P. 409-414.

А. С. МАРТЫНЕНКО,^{1,2} С. А. ПИКУЗ,^{1,2} С. Н. РЯЗАНЦЕВ,^{1,2} И. Ю. СКОБЕЛЕВ,^{1,2} К. Д. БАИРД,³ Н. БУЗС,⁴ Н. ВУСЛИ,³ Л. ДОЭЛЬ,³ Ф. ДЮРЕЙ,³ Р. КОДАМА,^{5,6} К. ЛАНКАСТЕР,³ П. МАК КЕНА,⁷ К. Д. МЁРФИ,³ Т. А. ПИКУЗ,^{1,5} К. СПИНДЛО,⁴ А. Я. ФАЕНОВ,^{1,5} Д. ФАРЛИ³

¹ Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³ Институт физики плазмы Йорка, Кафедра Плазмы, Йоркский Университет, Йорк, Соединённое королевство

⁴ Центральная лазерная установка, Лаборатория Резерфорда-Эплтона, Дидкот, Соединённое королевство

⁵ Институт для открытых и междисциплинарных научных инициатив, Осакий Университет, Осака, Япония

⁶ Институт лазерной инженерии, Осакий Университет, Сюита, Япония

⁷ Кафедра Физики, Университет Страйклайда, Глазго, Соединённое королевство

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ПЛАСТИКОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ПЛОТНОСТЬ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗОВАННОЙ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИШЕНЯХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ СВЕРХКОНТРАСТНЫМИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния слоистой структуры мишени [1] на процесс её нагрева высококонтрастными лазерными импульсами [2]. На основании сравнения экспериментальных и модельных эмиссионных рентгеновских спектров высокоионизированной кремниевой плазмы были определены плотности и температуры плазмы, генерируемой в эксперименте, проведённом на установке Vulcan PW (Великобритания), интенсивность лазерного излучения которой достигала порядка 6×10^{20} Вт/см², а контраст – 10^{10} . Среди используемых мишеней были т.н. «слоистые», наружный слой которых являлся прозрачным для лазерного излучения, а внутренний твердотельный слой – поглощающим. Показано, что при использовании подобных сложных мишеней обеспечивается создание плазмы с плотностью близкой к твердотельной и со сверхвысокой плотностью энергии, достигающей 5×10^7 Дж/см³. Также демонстрируется, что для достижения подобных параметров, применения лишь технологии оптического параметрического усиления чирпированных импульсов (ОСРА) недостаточно: требуется использование дополнительных средств повышения степени лазерного контраста, например, плазменного зеркала [3], как это было реализовано в обсуждаемом эксперименте.

A.S. MARTYNENKO^{1,2}, S.A. PIKUZ^{1,2}, S.N. RYAZANTSEV^{1,2}, I.YU. SKOBELEV^{1,2}, C. BAIRD³, N. BOOTH⁴, L. DOEHL³, P. DUREY,³ A. YA. FAENOV,^{1,5} D. FARLEY,³ R. KODAMA,^{5,6} K. LANCASTER,³ P. MCKENNA,⁷ C. D. MURPHY,³ C. SPINDLOE,⁴ T. A. PIKUZ^{1,5}, AND N. WOOLSEY³

¹Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

Moscow, Russia

³*York Plasma Institute, Department of Physics, University of York, York, UK*

⁴*Central Laser Facility, STFC Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, UK*

⁵*Open and Transdisciplinary Research Initiative, Osaka University, Osaka, Japan*

⁶*Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita, Japan*

⁷*Department of Physics, SUPA, University of Strathclyde, Glasgow, UK*

EFFECT OF PLASTIC COATING ON THE DENSITY OF PLASMA FORMED IN SOLID TARGETS IRRADIATED BY ULTRA HIGH-CONTRAST RELATIVISTIC LASER PULSES

The role of a buried (or so-called “sandwich-type” [1]) target structure influencing the plasma condition in the interaction with ultra-high contrast ultra-intense laser pulses was studied [2]. The experiment was carried out on the Vulcan (UK) petawatt laser facility with a laser intensity of up to 6×10^{20} W/cm² and an ultra-high laser contrast exceeding 10^{10} provided together by OPCPA amplification technology and by use of a single plasma mirror [3]. The densities and temperatures of the generated plasma were measured based on the analysis of X-ray spectral lines profiles and relative intensities. It is shown that switching from uncoated foil to buried one enhances the energy density in relativistic plasma from 3 to 5×10^7 J/cm³, despite the ultra-high laser contrast in both cases.

Список литературы

1. Chen S., Gregori G., Patel P. K., Chung H.-K. and others// Phys. Plasmas 2007 Vol. 14, № 10, 102701.
2. Martynenko A.S.; Pikuz S.A.; Skobelev I.Y. and others// Phys. Rev. E 2020 [accepted]
3. Doumy G., Quere F., Gobert O., and others// Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. 2004, V. 69, 026402

В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ¹, О.А. ОМАРОВ¹,
Г.Б. РАГИМХАНОВ¹, З.Р. ХАЛИКОВА¹, Д.В. ТЕРЕШОНОК²

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия
²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ГЕЛИИ

В работе представлены результаты экспериментального исследования пространственно-временной динамики формирования импульсного разряда в гелии атмосферного давления в сантиметровом межэлектродном промежутке, а также результаты исследования спектров оптического излучения разряда.

V.S. KURBANISMAILOV¹, O.A. OMAROV¹,
G.B. RAGIMKHANOV¹, Z.R. KHALIKOVA¹, D.V. TERESHONOK²

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia
²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DYNAMICS OF FORMATION OF OPTICAL RADIATION OF PULSE DISCHARGE PLASMA IN HELIUM

The paper presents the results of an experimental study of the spatio-temporal dynamics of the formation of a pulsed discharge in atmospheric pressure helium in a centimeter-wide electrode gap, as well as the results of an investigation of the optical radiation spectra of a discharge.

Представлены результаты экспериментального исследования динамики формирования оптического излучения плазмы импульсного разряда в гелии атмосферного давления в сантиметровом межэлектродном промежутке [1].

С применением фотоэлектронного регистратора (ФЭР2-1) установлено, что после приложения высоковольтного импульса напряжения на предварительно ионизированный промежуток, с концентрацией электронов $n_0=10^8\text{см}^{-3}$, первое регистрируемое свечение возникает на аноде которое в дальнейшем в виде диффузного свечения распространяется к катоду с характерной скоростью $\sim 10^7$ см/с. После прихода фронта свечения на катод, разряд переходит в следующую фазу - фазу объемного горения.

Установлено, что малых внешних полях ($E_0 < E_{кр} = 6$ кВ/см) горит однородный ОР, а развитие незавершенных анодонаправленных каналов, при-

вязанных к катодным пятнам с высокой проводимостью (плазменных каналов) начиналось при плотности тока ~ 40 А/см². В межэлектродном пространстве сохранялась хорошая однородность плазмы разряда. Увеличение

плотности тока до 60 A/cm^2 ведет к дальнейшему продвижению незавершенных анодонаправленных каналов.

При плотности тока более 100 A/cm^2 происходит перекрытие разрядного промежутка плазменным каналом.

Выполнены исследования по изучению закономерностей формирования спектра оптического излучения самостоятельного объемного разряда в гелии при различных энерговкладах в разряд (в режиме однородного горения, ОР с катодными пятнами и привязанными к ним диффузными каналами, контрагированный разряд и СДР).

Следует отметить, что в спектре разряда наряду с линиями исследуемого газа (He) возбуждаются линии материала электродов (Fe) (см. рис.1)

С увеличением энерговклада в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые спектральные линии исследуемого газа (He) и материала вещества электродов (Fe). Это позволяет предположить, что линии паров материала электродов формируется не только при взрывных процессах на катоде, но и при эмиссии или эрозии электродов.

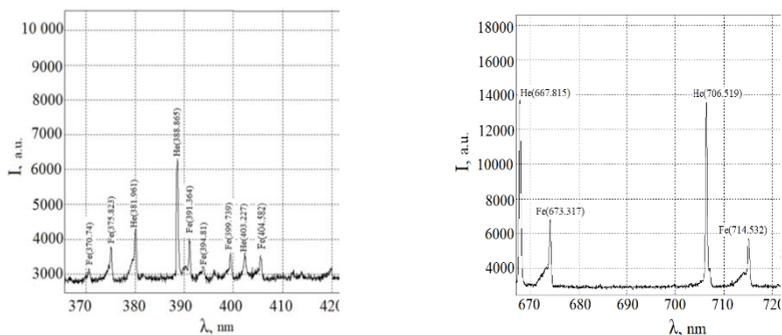


Рис.1. Панорамные спектры излучения в плазме импульсного объемного разряда в He: $U_0=12 \text{ кВ}$ ($d = 1 \text{ см}$, $p = 1 \text{ атм}$)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00333а)

Список литературы

1. Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б. ЖТФ. 2019. Вып. 3. С. 384-386.

В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ¹, Г.Б. РАГИМХАНОВ¹,
З.Р. ХАЛИКОВА¹, Д.В. ТЕРЕШОНОК²

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия
²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ ГАЗА

В настоящей работе в условиях равномерной предварительной ионизации газа аргона при атмосферном давлении выполнено расчетно-теоретическое исследование формирования импульсного ОР.

V.S. KURBANISMAILOV¹, G.B. RAGIMKHANOV¹,
Z.R. KHALIKOVA¹, D.V. TERESHONOK²

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia
²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

FORMATION OF A NANoseconds DISCHARGE IN ARGON OF ATMOSPHERIC PRESSURE IN CONDITIONS OF PRELIMINARY GAS IONIZATION

In the present work, under conditions of uniform preliminary ionization of argon gas at atmospheric pressure, a theoretical and theoretical study of the formation of pulsed OR is performed.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию импульсных объемных разрядов (ОР), многие вопросы, связанные с физикой формирования начальных стадий вызывают научные дискуссии [1-3].

В работе выполнено численное моделирование импульсного разряда в аргоне атмосферного давления в двумерной осесимметричной постановке. Расчетная модель включает в себя уравнение баланса частиц для электронов, атомарных Ar^+ и молекулярных ионов Ar_2^+ , нижних возбужденных уровней $Ar(1s_5)$, $Ar(1s_4)$, $Ar(1s_3)$, $Ar(1s_2)$, высоковозбужденных уровней $Ar(hl)$ (объединение 2p, 2s, 3d, 3p в один уровень) и эксимеров Ar_2^* .

Всего рассматривалось более 130 реакций. Константы брались из [5–7] и определялись температурой электронов, которая находилась из решения уравнения для энергии электронов. Самосогласованное электрическое поле находилось из уравнения Пуассона. Нагрев нейтрального газа не учитывался. Температура тяжелых частиц в процессе счета предполагалась равной температуре нейтрального газа – 300 К.

Расчет выполнен по явной схеме со вторым порядком точности по времени и пространству. Сходимость решения подтверждалась совпадением расчетных значений на разных сетках. В межэлектродном промежутке сетка была равномерная, по радиусу – со сгущением. Начальная концентрация задавалась на оси разрядного промежутка функцией Гаусса с максимальной концентрацией электронов и атомарных ионов 10^7 см^{-3} .

В частности, на рис.1. приведены характерные распределения некомпенсированного заряда (а) и продольной составляющей напряженности электрического поля (б) в межэлектродном промежутке для различных моментов времени. Показано, что образование немоного поведения объемного заряда внутри разрядного промежутка есть результат одновременного развития двух волн ионизации, которые движутся в противоположных направлениях. С внешней стороны фронта ионизации напряженность большая, внутри – резко падает, так как там образуется квазинейтральная плазма. По мере развития разряда идет формирование катодного слоя, в котором $n_e \ll (n_i + n_{i2})$.

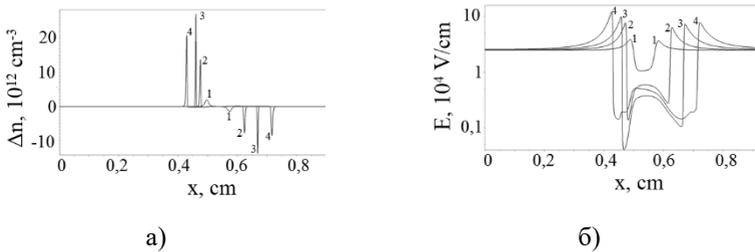


Рис.1. Нескомпенсированный заряд (а) и продольная составляющая напряжённости электрического поля (б) в моменты времени: 1,5нс, 2нс, 2,5нс и 3 нс

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00075а)

Список литературы

1. Xi-Ming Zhu and Yi-Kang Pu 2010 J. Phys. D: Appl. Phys. 43 015204.
2. Peng Tian and Mark J Kushner 2015 Plasma Sources Sci. Technol. 24 034017 (28pp).
3. W Van Gaens and A Bogaerts 2013 J. Phys. D: Appl. Phys. 46 275201 (53pp).
5. M. Baeva, A. Bosel, J. Ehlbeck, and D. Loffhagen 2012 PHYSICAL REVIEW E 85, 056404.
6. Hagelaar G. J. M, Pitchford L. C. 2005 Plasma Sources Sci. Technol. 14 722–733.
7. Смирнов Б.М. Свойства газоразрядной плазмы / Б.М. Смирнов. - Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та. 2010.

С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹, М.Х. ГАДЖИЕВ²,
Н.А. ДЕМИРОВ² Г.Б. РАГИМХАНОВ¹, З.Р. ХАЛИКОВА¹
¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия¹
²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия²

ПРОВОДИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ С ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ

В рамках простой модели рассмотрены проводимость и термоэлектрический эффект в электронном газе с фрактальной структурой. Получена формула Кубо для проводимости. Исследованы зависимости проводимости при различных значениях фрактальной размерности. Полученные результаты представляют интерес для наноэлектроники.

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV¹, M.KH. GADZHIMEV²,
N.A. DEMIROV², G.B. RAGIMKHANOV¹, Z.R. KHALOKOVA¹

¹*Dagestan State University, Makhachkala, Russia*
²*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow*

CONDUCTIVITY IN AN ELECTRONIC GAS WITH FRACTAL DIMENSION

In the framework of a simple model, the conductivity and thermoelectric effect in an electronic gas with a fractal structure are considered. The Kubo formula for conductivity is obtained. The dependences of conductivity for different values of fractal dimension are investigated. The results obtained are of interest for nanoelectronics.

Системы, обладающие фрактальной структурой, являются объектом, привлекающим к себе в последнее время внимание многих исследователей. Системы с фрактальной структурой обладают необычными свойствами. В частности, в работах [1, 2] было показано, что температура перехода в сверхпроводящее состояние для системы с фрактальной структурой очень большая по сравнению с обычными системами. В работах [3-6] был исследован вопрос о термодинамических свойствах фрактальных структур, была разработана теория теплоемкости для таких структур. Эти и многие другие исследования систем с фрактальной структурой очень интересны в связи с большими возможностями современной нано- и микротехнологии.

В работе в рамках простой модели рассмотрены динамическая и статическая проводимость в электронном газе с фрактальной структурой.

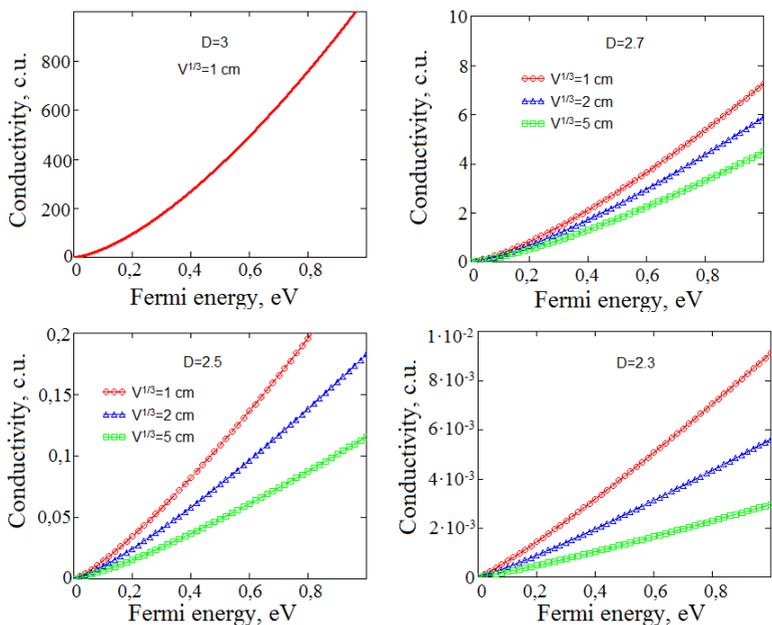


Рис. 1. Статическая проводимость при нулевой температуре в зависимости от энергии Ферми для различных значений фрактальной размерности

В частности, на рис. 1 показана статическая проводимость при нулевой температуре в зависимости от энергии Ферми для различных значений фрактальной размерности. При построении кривых мы положили $V^{1/3} = 1\text{cm}$, $m^* = 10^{-27} g$.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 18-08-00092а.

Список литературы

1. Milovanov A. V., Rasmussen J. J., arXiv:cond-mat/0201504v3.
2. Wang X-B., Li J-X., Jiang Q., Zhang Z-H. // Phys. Rev. 1994. V. 49. N 14. P. 9778-9781.
3. Рехвиашвили С. Ш. // Письма в ЖТФ. - 2004. - Т. 30. - № 22. - С. 65-69.
4. Рехвиашвили С. Ш. // ЖТФ. -2008. -Т. 78. - № 12. - С. 54-58.
5. Рехвиашвили С. Ш. // ЖТФ. - 2010. -Т. 36. - № 17. - С. 42-47.
6. Кузнецов В. М., Хромов В. И. // ЖТФ. - 2008. - Т. 78. - № 11. - С. 11-16.

В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ,
Б.Р. КАХРАМОНОВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РВз, Ташкент, Узбекистан.

ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе исследовались особенности воздействия катодных пятен вакуумного дугового разряда на металлическую поверхность образца-катода (структура, фазовый состав).

V.N ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. KHUDOYKULOV, B.R.
KAXRAMONOV

*Institute of ion-plasma and laser technologies, Uzbek Academy of Sciences, Tashkent,
Uzbekistan*

FEATURES OF PLASMA VACUUM ARC PROCESSING OF STEEL SURFACE

In this work, we studied the features of the effect of cathode spots of a vacuum arc discharge on the metal surface of a cathode sample (structure, phase composition).

При воздействии катодного пятна с температурой 5000K и площадью воздействия 10^{-4} см²) вакуумной дуги происходит сильный разогрев микрообласти поверхности и ее последующее быстрое охлаждение. Исследования воздействия катодных пятен вакуумного дугового разряда на металлическую поверхность образца-катода (структура, фазовый состав) осуществлялись, в диапазоне токов разряда 60А-180А., исследовались методом рентгенофазового анализа, на дифрактометре ДРОН-2 в Cr- и Fe-излучении. Обработка стальной поверхности дуговым разрядом в вакууме приводит к появлению в поверхностном слое микронапряжений II рода, вызывающих искажения решетки кристаллитов порядка $(2,2-3,3) \cdot 10^{-3}$. Размер блоков мозаики при этом составляет $\sim 0,1-0,2$ мкм. Изменение тока дугового разряда практически не влияет на период решетки (величина $\Delta a/a$ остается постоянной и равной $\sim 1 \cdot 10^{-3}$), но сказывается на величине размера блоков мозаики. С повышением тока дугового разряда происходит измельчение блоков, что можно объяснить плавлением большей области поверхности стального образца при воздействии на нее дуговым разрядом в вакууме. Таким образом, обработка стальной поверхности вакуумным дуговым разрядом приводит к фазовым (появление аустенита) и структурным (появление микронапряжений второго рода и измельчение блоков мозаики) изменениям, интенсивность которых зависит от режима обработки. Влияние воздействия вакуумного дугового разряда на распределение легирующих элементов (С, Мп, Cr, Si) в приповерхностном слое изучалось на образцах из стали 65Г. При воздействии плазмы катодного пятна происходит перераспределение легирующих элементов в приповерхностном слое в

зоне воздействия катодного пятна, которое сохраняется и после его охлаждения. их распределение коррелирует со следами воздействия катодных пятен на поверхность. В центре зоны воздействия катодного пятна легирующие элементы практически отсутствуют вследствие интенсивного испарения материала из этой зоны. Из-за малого времени существования катодного пятна на границе зоны воздействия возникает сильный градиент температур и происходит быстрое охлаждение расплава, приводящее к накоплению легирующих элементов. Идентичность распределения Si и C, связана с близкими значениям коэффициентов диффузии этих элементов в феррите (при 1500°C $D_C=5,4 \cdot 10^{-5}$ см²/с, $D_{Si}=8,4 \cdot 10^{-5}$ см²/с). Распределения Cr и Mn несколько отличаются друг от друга, во-первых, из-за более высокого по сравнению с другими легирующими элементами содержания в этой стали марганца (~0,7% C, менее 0,25% Cr и Si, Mn≤1,6%) и, во-вторых, из-за гораздо более низкого, чем для углерода и кремния, коэффициента диффузии хрома (при 1500°C $D_{Cr}=8,4 \cdot 10^{-7}$ см²/с. Проведенные исследования показали, в локальной области воздействия катодного пятна, происходит термическая обработка приповерхностного слоя с последующим интенсивным охлаждением за счет теплоотвода в объем образца, что приводит к фазовым и структурным изменениям в поверхностном слое обрабатываемого металла, изменяющем ее свойства. В поверхностном слое возникают микронапряжения II рода, а искажения решетки кристаллов в большинстве случаев составляют от 2,2 до 3,3·10⁻³. С увеличением тока а разряда происходит оплавление большей области поверхности и, как следствие, интенсивное измельчение блоков мозаики. Сильный разогрев приповерхностного слоя, в зоне воздействия катодного пятна (2-5мкм), сопровождается перераспределением легирующих элементов внутри этой зоны, на границе которой происходит накопление легирующих элементов.

Список литературы

1. В.Н. Арустамов, Х.Б.Ашууров, И.Х. Худайкулов, Б.Р. Кахрамонов «Параметры «белого слоя» формируемого при вакуумно- дуговой обработке стальной поверхности катодными пятнами» «Физика и химия обработки материалов» РАН Россия, год 2016 № 6

**В.Н. АРУСТАМОВ, Р.Х. АШУРОВ, В.М. РОТШТЕЙН,
Х.Б. АШУРОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ.**

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ташкент, Узбекистан

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

В работе представлены методы очистки поверхности подложек перед нанесением покрытий вакуумно-плазменными способами. Представлены ИК спектры и спектры комбинационного рассеяния (КР), полученные в результате аналитических исследований состояния поверхности образцов. На основе анализа интенсивностей ИК и КР спектров, продемонстрирована зависимость степени чистоты поверхности образцов от применяемого метода очистки.

**V.N ARUSTAMOV, R.KH. ASHUROV, V.M. ROTCHTEIN, KH.B.
ASHUROV, I.KH. KHUDAYKULOV,**

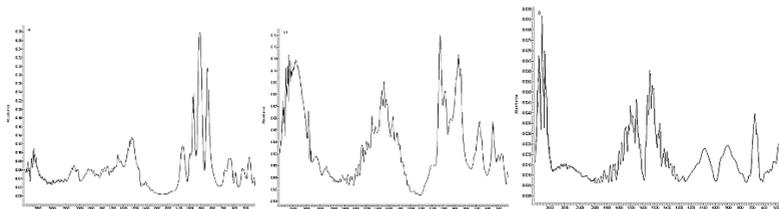
*Institute of ion-plasma and laser technologies, Uzbek Academy of Sciences, Tashkent,
Uzbekistan*

FEATURES OF DEPOSITION OF PLASMA VACUUM DISCHARGE

The paper presents methods for cleaning the surface of substrates before coating with vacuum-plasma methods. The IR spectra and Raman spectra obtained from analytical studies of the surface state of samples are presented. Based on the analysis of the intensities of the IR and Raman spectra, the dependence of the degree of surface purity of the samples on the cleaning method used is demonstrated.

Вакуумные ионно-плазменные технологии применяются для обработки поверхности изделий, нанесения различных функциональных покрытий, [1] при этом их свойства определяются как параметрами нанесения, так и состоянием поверхности подложки [2]. Загрязнения поверхности изделия являются основным фактором, определяющим качество наносимого покрытия и его работоспособность. Технологический процесс очистки поверхности ионами тлеющего разряда осуществлялся при давлении в камере 10^{-1} - 10^2 Па, плотности тока ионов до 10 мА/см², и напряжении на электродной системе 600-1000В. Степень загрязнения поверхности образцов оценивалась с использованием Фурье спектрометра Agilent Technologies Cary 640 Series FTIR Spectrometer), позволяющего проводить идентификацию неизвестных материалов, определять функциональные группы в органических и неорганических веществах, количественно определять компоненты в различных смесях. Эффективность процесса очистки поверхности изделий анализировалось с помощью ИК фурье-спектрометра до и после каждого технологического цикла. Анализ ИК-спектров поверхности изделия. показал наличие целого ряда различных загрязнений.

Согласно [3.] можно предположить, что полосы поглощения в области 3400см^{-1} , 1400см^{-1} и $400-600\text{см}^{-1}$ характерны для Fe_2O_3 , полосы поглощения в области 3200см^{-1} , 2900см^{-1} и $1300-1500\text{см}^{-1}$ характерны для масел минеральных, полосы поглощения в области 1600см^{-1} характерны для ароматических углеводородов, в области 1500см^{-1} характерны для вазелина, а в области $800-1000\text{см}^{-1}$ характерны для парафина.



а б в

Рис. 1. ИК-спектры поверхности изделия; а)-до процедур очистки,

б) после процедур очистки, в)- после очистки тлеющим разрядом. Анализ интенсивности соответствующих пиков приведённых выше ИК спектров, позволяет оценить эффективность каждого этапа очистки поверхности изделия. Однако степень очистки присутствующих видов загрязнений различна. Так, если степень очистки для загрязнений, соответствующих частотам поглощения в области $1300-1500\text{см}^{-1}$, увеличилась в два раза, то степень очистки для загрязнений, соответствующих частотам поглощения в области $800-1000\text{см}^{-1}$, увеличилась в девятнадцать.

Список литературы

1 V. N. Arustamov, K. B. Ashurov, Kh. Kh. Kadirov, and I. Kh. Khudaykulov

Effect of the Cathode Spots of a Vacuum Arc on the Properties of the Surface Layer of Structural Materials Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 2014, Vol. 8, No. 3, pp. 573–580.

2 К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма : Введение в физику поверхности : Ин-т автоматки и процессов упр. ДВО РАН. - М.: Наука, 2006. - 490 с.

3. Ш.Н. Алиева, А.М. Керимова, Р.Б. Абдуллаев, Т.Р. Мехтиева Инфракрасные спектры диффузного отражения микропорошков // Физика твердого тела, 2017, том 59, вып. 3 стр.528-5336.

В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ,
Б.Р. КАХРАМОНОВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ташкент, Узбекистан

К ВОПРОСУ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА

В работе приводятся результаты теоретического исследования поведения свободной энергии при нанесении тонких пленок из низкотемпературной плазмы для выявления возможности получения аморфных структур.

V.N ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. KHUDOYKULOV,
B.R. KAXRAMONOV

Institute of ion-plasma and laser technologies, Uzbek Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

ON THE ISSUE OF COATING FROM A VACUUM DISCHARGE PLASMA

The paper presents the results of a theoretical study of the behavior of free energy during the deposition of thin films from low-temperature plasma to identify the possibility of obtaining amorphous structures.

Выражение для свободной энергии как функции размеров скопления новой фазы будет иметь вид

$$G = -\frac{2}{3}\pi \frac{RT}{2} \left(\ln \frac{P}{P_n} \right) \left(r^3 - \frac{3}{2}br^2 - \frac{3a}{r} \right), \quad (1)$$

где

$$b = \frac{2\sigma}{\frac{RT}{\Omega} \ln \frac{P}{P_n}}, \quad a = \frac{q^2}{8\pi\varepsilon \frac{RT}{\Omega} \ln \frac{P}{P_n}}$$

Предполагается, что поверхность скопления состоит из плоской поверхности раздела металл - диэлектрическая подложка и полусферической границы с плазмой. Согласно (1), в определенных условиях свободная энергия может достигать экстремальных значений при размерах скоплений, удовлетворяющих уравнению

$$r^4 - br^2 + a = 0. \quad (2)$$

При этом ход свободной энергии существенно зависит от величины параметра $\lambda = \frac{16^2 a}{3^3 b^4}$ (рисунок 1). Рассмотрим условия конденсации, при которых

$\lambda > 1$. Ход свободной энергии для этого случая (кривая 2) показывает отсутствие энергетического порога при конденсации, свидетельствующее о разупорядоченности структур таких пленок. При $r_4 \approx a^{1/4}$ на кривой $G(r)$ имеется перегиб.

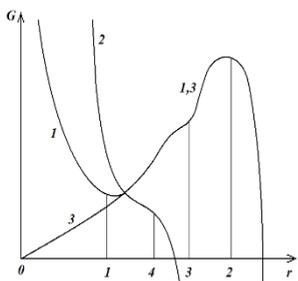


Рис.1. Изменение свободной энергии с ростом размера скопления новой фазы для $0 < \lambda < 1$ (1), $\lambda > 1$ (2) нейтрального скопления (3)

Для сравнения на рисунке 1 приведена $G(r)$ для нейтрального скопления (кривая 3). Можно считать справедливым соотношение $\ln \frac{P}{P_n} = \ln \frac{N \downarrow}{N \uparrow}$, где $N \downarrow$ и $N \uparrow$ интенсивности потоков осаждаемых и реиспаряемых частиц. Рассмотрим возможный ход свободной энергии для алюминиевых пленок,

наносимых на подложку из NaCl в условиях дугового разряда при следующих значениях величин: $N \downarrow = 10^{22}$ атм \cdot с, $T = 300$ К, $N \uparrow = 10^{-15}$ атм \cdot с получаем с помощью зависимости $N \uparrow = \frac{P_n}{\sqrt{2\pi m kT}}$ и значения $P_n = 10^{-4}$ торр, где $m \approx 5 \cdot 10^{-26}$ кг — масса атома алюминия, k — постоянная Больцмана. Для других величин, входящих в λ , примем следующие значения: $\epsilon = 1$, $\Omega = 10$ см 3 , $\sigma = 1157$ эрг см 2 , $q = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ. В результате вычислений $\lambda \approx 80$. Такому значению λ , согласно изложенному, соответствует изменение свободной энергии, изображенное кривой 2, и указывает на отсутствие энергетического барьера при конденсации пленки в условиях эксперимента. Электронографическим исследованием алюминиевых пленок показывает, что их структура аморфная.

**В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ,
Б.Р. КАХРАМОНОВ**

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ташкент,
Узбекистан.*

ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИОНАМИ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

В работе рассмотрены основы реализации процесса очистки поверхности изделий, ионами плазмы тлеющего разряда в вакууме, генерации разряда, формирования эффективного ионного воздействия на поверхность изделия, с целью удаления различных загрязнений.

**V.N ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. KHUDOYKULOV, B.R.
KAXRAMONOV**

*Institute of ion-plasma and laser technologies, Uzbek Academy of Sciences, Tashkent,
Uzbekistan*

CLEANING THE SURFACE OF PRODUCTS WITH PLASMA IONS GLOW DISCHARGE

The paper discusses the basics of the implementation of the process of cleaning the surface of products, plasma glow ions in vacuum, generating a discharge, the formation of an effective ionic effect on the surface of the product, in order to remove various contaminants.

В основе ионно-плазменных технологических процессов обработки поверхности изделий лежит использование плазмы тлеющего разряда низкого давления в качестве источника частиц для обработки материалов. Приобретая необходимую энергию, ионы плазмы газового разряда, воздействуют на поверхность изделия- катода, находящимся под отрицательным потенциалом, осуществляют физическое распыление размещенных на поверхности частиц. На Рисунке 1 представлена блок схема процесса очистки ионами плазмы тлеющего разряда. Энергией ионов определяется глубина их воздействия на приповерхностный слой материала изделия. При энергии ионов порядка 0.6-2кэВ, воздействию подвергается поверхностный слой материала изделия, в результате которого происходит удаление атомов материалов различного рода наслоений, загрязнений, размещенных на ней. Энергией ионов определяется глубина их воздействия на приповерхностный слой материала изделия. При энергии ионов порядка 0.6-2кэВ, воздействию подвергается поверхностный слой материала изделия, в результате которого происходит удаление атомов материалов различного рода наслоений, загрязнений, размещенных на ней



Рис.1. Блок схема процесса очистки ионами плазмы тлеющего разряда

При энергии ионов порядка 0.6-2кэВ, воздействию подвергается поверхностный слой материала изделия, в результате которого происходит удаление атомов материалов различного рода наслоений, загрязнений, размещенных на ней. Техническая система для ионной, ионно-плазменной обработки материалов обеспечивает условия для:-функционирования тлеющего электрического разряда в вакуумированном пространстве камеры вакуумной установки; -формирования потока ионов плазмы разряда в направлении обрабатываемой поверхности изделия; -осуществления взаимодействия потока ионов с обрабатываемой поверхностью изделия. Разряд зажигается в атмосфере рабочего газа (инертные газы) при давлении в камере $10\text{-}10^{-1}\text{Па}$, Плотность тока ионов до 10 мА/см^2 , напряжение на электродной системе 600 -1000В. Предусматриваются -формирование ионного потока из плазмы разряда на обрабатываемую поверхность изделия; - очистка, обработка поверхности изделия ионами газа. Ионы плазмы тлеющего разряда под действием электрического поля в прикатодной области разряда, бомбардируют поверхность изделия -катода в результате с одной стороны генерируется ионно-электронная эмиссия, обеспечивающая протекание разряда с другой происходит удаление загрязнений, наслоений, включений с обрабатываемой поверхности [1]. В результате очистки поверхности повышается её адгезионные свойства, происходит её активация, улучшается геометрическая однородность, повышающие однородность, срок службы покрытий.

Список литературы

1. В.А. Лисовский, С.Д. Яковин Характеристики катодного слоя тлеющего разряда низкого давления в аргоне и азоте Письма в ЖТФ 2000, том 26, вып.19 сс.88-94

В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ,
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ташкент, Узбекистан.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАТОДА НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КАТОДНОЙ ОБЛАСТИ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

В работе представлены результаты исследования влияния температуры катода вакуумной дуги на, характеристики дугового разряда, трансформацию приэлектродных процессов

V.N ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. KHUDOYKULOV.

Institute of ion-plasma and laser technologies, Uzbek Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

TEMPERATURE EFFECT OF THE CATHODE ON CHARACTERISTICS OF THE VACUUM ELECTRIC ARC AND TRANSFORMATION OF THE CATHODE SPOT

The paper presents the results of a study of the influence of the cathode temperature of a vacuum arc on the characteristics of an arc discharge, transformation of near-electrode processes

Существенное влияние на процессы генерации заряженных частиц в прикатодной области разряда. оказывает температура катода [1]. Температура катода определяет, как наличие на поверхности различных загрязнений, так и процессы эмиссии, с катода. Поэтому исследование трансформации приэлектродных явлений при различной температуре катода имеет важное значение для понимания физических процессов, протекающих на поверхности электрода.



Рис.1. Осциллограмма напряжения и тока дугового разряда при температуре катода $T = 300\text{K}$ - а, и $T = 2000\text{K}$ - б.

Исследование дугового разряда на «горячем» катоде проводилось в импульсном режиме. при температуре катода до 300K - 2300K . Ток разряда регулировался изменением напряжения источника питания $-U_{\text{нв}}$

пределах 350-1200А. Длительность разряда составляла 1.5мс. Характерная осциллограмма напряжения и тока разряда

при $T = 300$ К и $T = 2000$ К приведены на рис.1а,б соответственно. Видно, что напряжение дугового разряда с ростом температуры катода несколько возрастает. Вольт-амперные характеристики дугового разряда, представлены на рис.2.

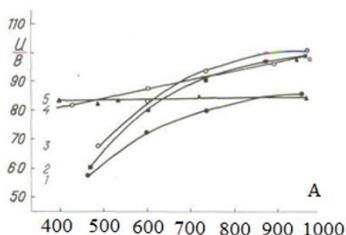


Рис.2. Вольт-амперные характеристики дугового разряда при температурах катода 300 - 2300 К. Кривая 1 - $T = 300$ К, кривая 2 - $T = 1000$ К, кривая 3 - $T = 1500$ К, кривая 4 - $T = 1900$ К, кривая 5 - $T = 2300$

Приведенные зависимости, соответствующие температуре катода до ~ 1800 К имеют возрастающий характер. Разность напряжений разрядов в области токов $\sim 10^3$ А достигает 13 -15 В. При относительно небольших токах разрядов 400-550А разность напряжений составляет 7 -10В. При относительно небольших токах разрядов 400 - 550А разность напряжений составляет 7 -10 В. С ростом температуры катода до 2300К положение меняется. Зависимость напряжения разряда от тока более слабая. Более того, при предельных температурах катода ~ 2300 К напряжение разряда практически не меняется с ростом тока разряда.

Список литературы

1. В.Н Арустамов, Х.Б Ашууров, И.Х Худойкулов, Б.Р Кахрамонов. К вопросу о реализации вакуумного дугового разряда с распределенным катодным пятном. ВИП-2019. сс 181-184

И.В.ВИЗГАЛОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Обсуждается механизм возбуждения поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) при взаимодействии неравновесной плазмы пучково-плазменного разряда с коллекторной пластиной в условиях развития вторично-эмиссионной неустойчивости. ПЭВ рассматривается как наиболее высокочастотная мода развития данной неустойчивости. Описываются основные свойства, механизмы и условия возбуждения.

I. V. VIZGALOV

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

EXCITATION OF SURFACE ELECTROMAGNETIC WAVES DUE TO THE SECONDARY EMISSION INSTABILITY

The possible mechanism for surface electromagnetic waves (SEW) excitation during interaction of a beam-plasma discharge with a highly emissive surface. SEW is described as the most high frequency mode of auto oscillations due to the secondary emission instability. The main features, mechanisms and excitation conditions are considered.

Вторично-эмиссионная неустойчивость плазменно-поверхностного взаимодействия может приводить к автоколебательному возбуждению разнообразных электромагнитных мод, отвечающих резонансным частотам довольно сложной динамической системы, включающей плазму, плазменно-поверхностные контактные слои, стенки камеры, ограничивающей плазму, элементы внешней цепи с источниками ЭДС, активными и реактивными элементами. Неустойчивость развивается при появлении у плазменно-поверхностного контакта N-образной мгновенной вольт-амперной характеристики (ВАХ). Это происходит, если в плазме присутствует достаточно высокоэнергетичная группа электронов, а на контактной поверхности сформировано наноразмерное по толщине диэлектрическое покрытие, обеспечивающее высокую вторичную эмиссию при бомбардировке электронами. Благодаря отрицательному дифференциальному сопротивлению у контактного слоя при отрицательном смещении потенциала поверхности проявляются свойства широкополосного усилителя. Малая инерция вторичной эмиссии приводит к усилению различных мод собственных колебаний вплоть до очень высоких частот. Предельная скорость положительной обратной связи определяется временем пролета электронами слоя объемного заряда, что по частоте соответствует сотням ГГц. Укажем основные типы собственных

резонансных колебаний при неустойчивом плазменно-поверхностном взаимодействии.

Наиболее низкочастотные автоколебания возбуждаются в контурах, включающих помимо плазменного канала и двух плазменно-поверхностных контактных слоев с объемным зарядом, обладающих свойствами нелинейной емкости, внешнюю цепь, с довольно большой индуктивностью. Характерные частоты составляют сотни кГц - единицы МГц. Автоколебания могут развиваться и без внешнего источника смещения - в условиях нарушения локальной амбиполярности. Соответствующие условия возникают в крупных установках с магнитным удержанием горячей плазмы. Высокочастотные моды (десятки и сотни МГц) могут возбуждаться в контурах без участия реактивных элементов внешней цепи. Такие автоколебания связаны с усилением по вторично-эмиссионному механизму разнообразных собственных высокочастотных мод системы плазменный шнур - плазменно-поверхностный контакт. Усиление ленгмюровских волн в СВЧ диапазоне возможно при отражении от неустойчивого плазменно-поверхностного контакта с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Еще более высокочастотная мода автоколебаний связана с возможностью генерации поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ), которая является особым решением уравнений Максвелла и распространяется вдоль поверхности раздела двух сред с положительной и отрицательной диэлектрической проницаемостью. Неустойчивый по вторично-эмиссионному механизму дебаевский слой и металл контактного устройства могут составить активную пару сред, способную не только каналировать, но и возбуждать ПЭВ. Причем, основная часть энергии ПЭВ определяется перпендикулярной к поверхности электрической составляющей, которая экспоненциально убывает при удалении от нее. ПЭВ миллиметрового диапазона, оставаясь прижатой к металлической поверхности, переносит энергию от зоны возбуждения на достаточно большие расстояния (метры), повторяя рельеф и проникая в мелкие отверстия, полости, зазоры и трещины. Вызываемые ПЭВ паразитные разряды способны существенно влиять на периферийные процессы в плазменных установках.

А.Б. ЛЯШЕНКО¹, А.А. ПШЕНОВ^{1,2}, А.А. СТЕПАНЕНКО¹

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

²*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

УЧЁТ ГЕОМЕТРИИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА ПРИ СОЗДАНИИ РАСЧЁТНЫХ СЕТОК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ БЛОБОВ В КОДЕ BOUT++

Разработан набор скриптов, преобразующих исходные (основанные на использовании квазибаллонной системы координат) расчетные сетки турбулентного кода BOUT++ с учётом с геометрии первой стенки токамака. Скрипты модифицируют систему координат расчетной сетки таким образом, что концы магнитных линии сетки оказывались точно на поверхности первой стенки установки. Успешно проведены проверочные расчёты движения блобов в модифицированной системе координат для геометрий магнитного поля и вакуумной камеры токамаков T15-МД и COMPASS.

A.B. LYASHENKO¹, A.A. PSHENOV^{1,2}, A.A. STEPANENKO¹

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

²*NRC “Kurchatov institute”, Moscow, Russia*

GENERATION OF TOKAMAK FIRST WALL-COMPLIANT GRIDS FOR SIMULATIONS OF BLOB DYNAMICS IN BOUT++

A set of scripts, modifying the initial BOUT++ modeling grids, based on the quasi-balloon coordinate system, has been developed. The scripts allow taking into account the geometry of the tokamak first wall, by altering the grid spacing so that the endpoints of the magnetic field lines are set exactly at the boundary of the first wall. Test calculations are successfully performed for the magnetic field and first wall geometries of the T15-MD and COMPASS tokamaks.

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 блобов широко применяется компьютерное моделирование их динамики в таких турбулентных кодах, как HESEL, GBS, BOUT++ [1, 2].

В рамках работы подготовлен инструмент для реалистичного моделирования динамики блоков в турбулентном коде **VOUТ++**, позволяющий учесть геометрию первой стенки токамака при создании расчётной сетки.

Встроенный в код **VOUТ++** [3] генератор расчетных сеток основан на использовании квазибаллонной системы координат. Её основное отличие от широко используемой тороидальной системы состоит в том, что в квазибаллонной системе одна из координатных осей направлена вдоль линий магнитного поля, а не по тору. Такая геометрия удобна для моделирования турбулентной динамики плазмы, однако в общем случае она не позволяет создавать расчётные сетки с учётом границ установки. На рисунке 1 показано, как вырезание сетки в квазибаллонной системе координат оставляет зазор между крайним (в полоидальном направлении) узлом и границей установки.

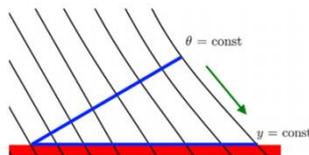


Рис. 1. Визуализация процесса вырезания сетки для квазибаллонной системы координат [4]

Для учёта геометрии первой стенки токамака, в исходной сетке кода **VOUТ++** был изменён шаг разбиения в полоидальном направлении. Шаг увеличивался отдельно для каждой магнитной линии таким образом, чтобы граничные узлы сетки оказывались точно на стенках установки. Такое преобразование осуществляет переход в модифицированную квазибаллонную систему координат, параметры которой (метрические тензоры, геометрические факторы) записаны скриптами в сетку кода **VOUТ++**.

Подготовленные сетки были проверены на ряде тестовых расчётов динамики блоков в токамаках **T15-МД** и **COMPASS**. Продемонстрированы результаты расчетов движения филаментов на периферии этих установок.

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. Leddy J., Dudson B., Romanelli M., Shanahan B., and Walkden N. // *Comput. Phys. Commun.* 2016. PP. 1–10.

К.В. САФРОНОВ, В.А. ФЛЕГЕНТОВ, С.А. ГОРОХОВ, Д.С.
ГАВРИЛОВ, С.Ф. КОВАЛЕВА, А.С. ТИЩЕНКО, Д.О. ЗАМУРАЕВ,
А.Л. ШАМРАЕВ, Е.С. МОКИЧЕВА, А.В. ПОТАПОВ

*Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТРАСТА 100 ТВт ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЯРКОСТИ ЗЕРКАЛЬНО ОТРАЖЕННОГО ОТ МИШЕНИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Временной контраст является одним из важнейших параметров мощных лазерных систем. При недостаточном контрасте предимпульс усиленного спонтанного излучения (УСИ), присущий установкам, работающим по принципу усиления chirпированного импульса, может образовывать плазму на поверхности твердотельной мишени, что снижает эффективность передачи энергии основного лазерного импульса плотным слоям мишени. Контраст влияет на эффективность лазерного ускорения ионов из тонких фольг [1], эффективность генерации и размер источника $K\alpha$ излучения [2], генерацию высоких гармоник [3]. Точное определение контраста – достаточно трудная задача, требующая проведения измерений с динамическим диапазоном более 10^{10} в интервале времен около нескольких наносекунд с разрешением порядка длительности основного лазерного импульса. В работе [4] предложен простой метод оценки энергии предимпульса УСИ по измерениям яркости отпечатка зеркально отраженного от мишени лазерного излучения на рассеивающем экране.

Используя данный метод, на 100 ТВт фемтосекундной лазерной установке были проведены измерения контраста. Исследования выполнены до и после установки в усилительный тракт насыщающегося фильтра RG850. Анализ изображений на рассеивающем экране позволил установить величину контраста. Исследования показали, что помимо предимпульса УСИ на коэффициент отражения влияет смена механизмов поглощения лазерного излучения при интенсивностях $10^{16} \dots 10^{17}$ Вт/см², что накладывает ограничение на применимость метода. В дополнение к проведенным экспериментам интенсивность УСИ была измерена посредством кросс-коррелятора 3-его порядка в диапазоне времен от -400 пс до 0 пс.

Список литературы

1. D. Neely et al., Appl. Phys. Lett. 89, 21502 (2006).
2. S. Fourmaux, J.C. Kieffer, Appl. Phys. B 122:162 (2016).
3. I.J. Kim et al., Journal of Opt. Soc. of Korea 13, 15 (2009).
4. A.S. Pirozhkov et al, Appl. Phys. Lett. 94 241102 (2009).

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

М.М. ЗОБОВ

Национальная лаборатория во Фраскати итальянского национального института ядерной физики (LNF INFN), Фраскати (Рим), Италия

УЧАСТИЕ LNF INFN В ПРОЕКТЕ CREMLIN+

Европейская комиссия недавно одобрила проект CREMLINplus (Connecting Russian and European Measures for Large-scale research INfrastructures) [1]. В рамках Horizon 2020, 25 миллионов Евро были выделены 35 европейским и российским институтам и организациям для участия в разработке 5 крупнейших российских научных проектов класса мегасайенс, а также для их технической подготовки к международному доступу и использованию. Национальная лаборатория во Фраскати (LNF) возглавляет участие итальянского национального института ядерной физики (INFN) в проекте, где также участвуют ещё три секции INFN (Bari, Ferrara и Lecce). INFN будет задействован в проектных исследованиях для двух российских мега проектов: Супер Чарм-Тау фабрики в Новосибирске, электрон-позитронного коллайдера с высокой светимостью, основанного на концепции Crab Waist, предложенной и успешно испытанной на итальянском лептонном коллайдере DAFNE во Фраскати, и USSR, источника синхротронного излучения 4-го поколения с малым эмиттансом накопленного пучка, который должен быть построен в Протвино (Московская область). В этой статье мы обсуждаем опыт LNF INFN в области проектирования и строительства ускорителей и детекторов частиц, который может быть использован для этих двух российских проектов, основанных на применении ускорителей заряженных частиц.

М. ZOBOV

*Frascati National Laboratories of Italian National Institute for Nuclear Physics LNF INFN,
Frascati (RM), Italy*

LNF INFN PARTICIPATION IN CREMLIN+ PROJECT

The European Commission has recently approved the CREMLINplus project (Connecting Russian and European Measures for Large-scale research INfrastructures) [1]. In the frameworks of Horizon 2020, 25 ME have been allocated for 35 European and Russian institutions and organizations to participate in development of the 5 Russian major mega-science projects and for their technical preparation for the international access and utilization. The Frascati National Laboratory (LNF) is leading the participation of Italian National Institute of Nuclear Physics (INFN) to the project, together with 3 other INFN sections (Bari, Ferrara and Lecce). INFN will contribute in the design studies for the two Russian mega-science projects: the Super Charm-Tau factory at Novosibirsk, the high luminosity electron-positron collider based on the crab waist concept proposed and successfully tested at Italian lepton collider DAFNE, and USSR, the low beam emittance synchrotron radiation source of the 4th generation to be built in Protvino (Moscow Region). In this paper we discuss the experience of LNF INFN in accelerator and particle detector design and construction which can be useful for the two Russian accelerator-based projects.

Список литературы

1. The work supported by Grant Agreement n. 871072-CREMLINplus.

Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ
Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ “QUASI-FROZEN SPIN” КОНЦЕПЦИИ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ДЛЯ ПОИСКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ДЕЙТРОНА

Одним из возможных аргументов для нарушения CP-инвариантности является существование не исчезающих электрических дипольных моментов (ЭДМ) элементарных частиц. Для поиска ЭДМ предлагается создать специальное накопительное кольцо [1], которое может реализовать режим “frozen spin”. Преимуществом разработанной нами “quasi-frozen spin” [2] концепции является возможность адаптировать существующие накопительные кольца для поиска ЭДМ дейтрона, в частности ускорительный комплекс NICA в ОИЯИ (Дубна)

Y.V. SENICHEV, A.E. AKSENTYEV

Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia

FEATURES OF THE QUASI-FROZEN SPIN CONCEPT OF THE SYNCHRON STORAGE RING FOR SEARCH FOR THE DEUTRON ELECTRIC DIPOLE MOMENT

One of the possible arguments for violating CP invariance is the existence of non-vanishing electric dipole moments (EDM) of elementary particles. To search for EDM, it was proposed to create a special storage ring [1], which can implement the “frozen spin” mode. An advantage of the “quasi-frozen spin” [2] concept developed by us is the ability to adapt existing storage rings to search for the deuteron EDM, in particular the accelerator complex NICA in JINR (Dubna).

В случае “quasi-frozen” spin (QFS) концепции нами разработаны два варианта магнитооптической структуры. В первом варианте электрическое и магнитное поля полностью пространственно разделены на магнитные арки и электрические прямые участки [3]. Однако эта концепция наследует недостаток цилиндрических электродов, а именно весь набор нелинейностей высокого порядка. Поэтому во втором варианте магнитооптической структуры QFS было введено небольшое вертикальное магнитное поле ~ 80 мТл в электрические элементы прямых участков, компенсирующее силу Лоренца электрического поля (рис. 1).

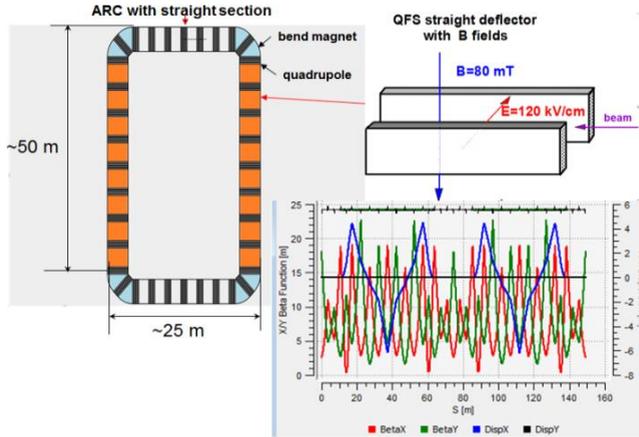


Рис.1: Магнитооптическая структура QFS с TWISS функциями

В данную опция магнитооптической структуры QFS также, как и первая включает в себя прямые участки с нулевой дисперсией в середине магнитных арок для установки поляриметра, систем экстракции и инжекции пучка и ВЧ резонаторы. В магнитной арке частицы вращаются на угол $\Phi_{arc}^B = \pi$ с одновременным вращением спина из-за магнитного дипольного момента (в дальнейшем МДМ вращения) в горизонтальной плоскости относительно

импульса на угол $\Phi_s^{arc} = \gamma G \cdot \Phi_{arc}^B$, где γ -фактор Лоренца, $G = \frac{g-2}{2}$ -

аномальность магнитного момента и g -гиромангнитное отношение. На прямом участке прямые элементы с полями E и B обеспечивают МДМ вращение спина в горизонтальной плоскости в противоположном направлении относительно

импульса в поле E на угол $\Phi_s^E = -\left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\beta^2 \cdot \Phi_{ss}^E$, где Φ_{ss}^E - вращение

импульса в электрическом поле, и в поле B на угол $\Phi_s^B = (\gamma G + 1) \cdot \Phi_{ss}^B$, где Φ_{ss}^B - импульс вращения в магнитном поле. Поскольку сила Лоренца в элементах прямых участков равна нулю, углы вращения импульса равны друг другу. Следовательно, они могут быть определены через одно из них, например, через

магнитное поле как $\Phi_{ss}^B = \frac{eB_{ss}}{m\gamma\nu} \cdot L_{ss}$, где B_{ss}, L_{ss} магнитное поле и длина прямого

элемента, соответственно. Чтобы реализовать концепцию QFS, мы должны

выполнить условие, $\Phi_{ss}^B - \Phi_{ss}^E = \Phi_{arc}^B$ то есть

$$(\gamma G + 1) \cdot \Phi_{ss}^B - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \beta^2 \cdot \Phi_{ss}^E = \gamma G \cdot \pi \quad (1)$$

Выполняя простые преобразования, получаем основное соотношение для параметров прямого элемента:

$$L_{\Sigma} E_{ss} = \frac{G}{G+1} \cdot \frac{mc^2}{e} \cdot \pi \beta^2 \gamma^3 \text{ и } B_{ss} = -\frac{E_{ss}}{c\beta}, \quad (2)$$

где L_{Σ} -общая длина прямых элементов в одном прямом участке. Таким образом, для получения максимального электрического поля на уровне 120 кВ / см требуется магнитное поле ниже 80 мТл. Это позволяет упростить общую конструкцию накопительного кольца. В частности, можно использовать постоянный магнит или электрическую катушку с воздушным сердечником.

Итак, в магнитооптической структуре QFS спин постоянно вращается в горизонтальной плоскости относительно вертикальной оси, отклоняясь попеременно в одну и другую сторону по отношению к направлению движения вдоль кольца, меняя направление и знак частоты $\Omega_{QFS} = \pm \Omega_{\text{arc}}$ при переходе от арки к прямому участку и наоборот. Одновременно из-за ошибок положения поворотных магнитов, в частности наклона магнита относительно продольной оси возникает поперечная компонента магнитного поля B_x , которая инициирует вращение спина в вертикальной плоскости $\Omega_x = \Omega_{Bx}$.

Чтобы проиллюстрировать это, давайте запишем решения уравнений Т-ВМТ с начальными условиями $S_x = 0, S_y = 0, S_z = 1, \Omega_z = 0$ и $\Omega_x \neq 0$ в простейшем виде:

$$S_x(t) = \frac{\Omega_y \sin(\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2} \cdot t)}{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}}; S_y(t) = -\frac{\Omega_x \sin(\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2} \cdot t)}{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}} \quad (3)$$

Здесь мы принимаем следующее обозначение координат: z продольное направление, x горизонтальное и y вертикальное направление. Принимая во внимание выше сказанное, мы можем представить компоненты частот $\Omega_y = \Omega_{QFS}$ и $\Omega_x = \Omega_{EDM} + \Omega_{Bx}$, где Ω_{EDM} частота вращения спина, обусловленная наличием ЭДМ, представляет собой горизонтальную

компоненту, и суммируется с частотой, вызванной наклоном магнита. С учетом того, что $\langle \Omega_y \rangle = \langle \Omega_{QFS} \rangle = 0$ близка к нулю

$$S_x(t) = \Omega_y / \Omega_x \cdot \sin(\Omega_{EDM} + \Omega_{Bx}) \cdot t; \quad S_y(t) = -\sin(\Omega_{EDM} + \Omega_{Bx}) \cdot t \quad (4)$$

Измеряя суммарную частоту $\Omega_{\Sigma}^{CW} = \Omega_{EDM} + \Omega_{Bx}$ и $\Omega_{\Sigma}^{CCW} = \Omega_{EDM} - \Omega_{Bx}$ для разных направлений движения пучка по часовой стрелке CW и против часовой стрелке, мы определяем $\Omega_{EDM} = 0.5(\Omega_{\Sigma}^{CW} + \Omega_{\Sigma}^{CCW})$

Список литературы

1. D. Anastassopoulos, et al., AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the $10^{-29} e \cdot \text{cm}$ level. BNL Report, 2008.
2. Y. Senichev et al., Investigating of lattice for deuteron EDM ring, Proceedings of ICAP 2015, Shanghai, China, pp. 17-19
3. Y. Senichev, et al., Quasi-frozen Spin Method for EDM Deuteron Search, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/papers/mopwa044.pdf>

Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ
 Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

ПОИСК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ДЕЙТРОНА В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ

Излагается идея поиска электрического дипольного момента (EDM) дейтрона с использованием поляризованных пучков в синхротронном накопительном кольце. Идея состоит в том, что колебание спина из-за возможного конечного электрического дипольного момента отделено от влияния магнитного дипольного момента (MDM), а поведение спина указывает на существование dEDM.

Y.V. SENICHEV, A.E. AKSENTYEV

Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia

SEARCH FOR THE ELECTRIC DIPOLE MOMENT OF A DEUTRON USING SYNCHROTRON STORAGE RING

The idea of searching for the electric dipole moment (EDM) of a deuteron using polarized beams in a synchrotron storage ring is presented. The idea is that the spin oscillation due to the possible final electric dipole moment is separated from the influence of the magnetic dipole moment (MDM), and the spin behavior indicates the existence of dEDM.

В методе «замороженного» спина (FS) [1] основная цель состоит в том, чтобы максимально увеличить рост предполагаемого сигнала EDM, который обеспечивается в среднем фиксированной ориентацией спина вдоль импульса, т.е. нулевой частотой вращения относительно импульса, вызванного магнитным дипольным моментом (в дальнейшем называемым МДМ прецессия) :

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{S}}{dt} &= \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{mdm} + \vec{\Omega}_{edm}), \\ \vec{\Omega}_{mdm} &= \frac{e}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \vec{B} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right\}, \\ \vec{\Omega}_{edm} &= \frac{e\eta}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right); \quad G = \frac{g-2}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $G = \frac{g-2}{2}$ - аномальность магнитного момента и g - гиромагнитное отношение, $\vec{\Omega}_{mdm}$ - частота прецессии спина, обусловленная магнитным дипольным моментом (в дальнейшем называемая частотой МДМ), $\vec{\Omega}_{edm}$ - частота прецессии спина, обусловленная электрическим дипольным моментом

(далее - частота ЭДМ, ω) и η является безразмерным коэффициентом, определяемым соотношением $d = \eta\epsilon\eta/4mc$. Выражение (1) определяет соотношение между электрическим и магнитным полями в элементах «E + B».

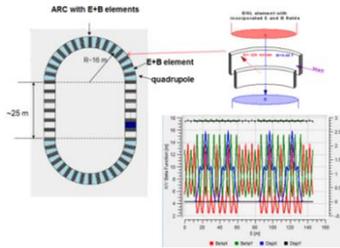


Рис.1: “Frozen spin” структура с TWISS функциями

Для дейтронов с отрицательным аномальным магнитным моментом $G = -0.143$ следует условие (2), когда прецессия МДМ равна нулю:

$$E_r = \frac{GBc\beta\gamma^2}{1 - G\beta^2\gamma^2} \approx GB_v c\beta\gamma^2 \quad (2)$$

Поэтому единственным возможным способом в этом случае является накопительное кольцо с электрическим и магнитным полями. Было предложено, чтобы продольно поляризованный пучок дейтронов с общим импульсом 1 ГэВ / с мог быть накоплен в электромагнитном накопительном кольце, где прецессия МДМ минимизирована по отношению к импульсу $\Omega_{mdm}^p = 0$. Это может быть сделано путем применения радиального электрического поля E_r , чтобы уравновесить вклад вертикального магнитного поля B_v относительно Ω_{mdm}^p , как показано в формуле (2).

Мы разработали специальную “frozen spin” структуру для измерения дейтрона EDM, которая основана на элементах «E + B». Структура FS имеет форму гасетрэк и содержит две арки и две прямые секции с нулевой дисперсией (см. Рис.1). Функции TWISS показывают огибающую и дисперсию пучка вдоль кольца. Мы изучили спин-орбитальную динамику в этом кольце с секстиполями, что позволило бы получить время спиновой когерентности более 1000 секунд.

Принимая во внимание, что аномальный магнитный момент дейтрона имеет малую абсолютную величину $G = -0.143$ и тот факт, что, если сделать арки с чисто магнитными элементами, а прямые участки с чистот

электрическими элементами, то спин отклоняется от направления импульса на малую величину на арке в одну сторону, и затем каждый раз возвращается на прямом участке в электрических. Очевидно, что эффективный вклад в ожидаемый эффект роста возможного EDM уменьшается только на несколько процентов. Это позволяет нам перейти к концепции квазимороженной спиновой QFS [2], где спин не является «замороженным», а слегка осциллирует относительно продольного направления (рис.2).

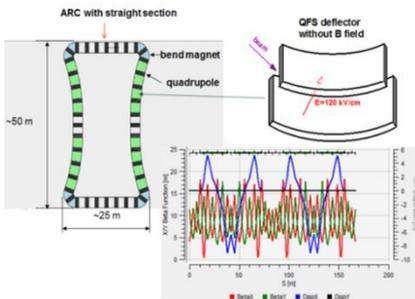


Рис.2: Рис.1: “Quasi-Frozen spin” структура с TWISS функциями

Во втором варианте структуры QFS было введено малое магнитное поле ~ 100 мТл, компенсирующее силу Лоренца электрического поля в элементах прямых участков, что позволило спрямить прямые участки.

Список литературы

1. D. Anastassopoulos, et al., AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the $10^{-29} e \cdot \text{cm}$ level. BNL Report, 2008.
2. Y. Senichev, et al., Quasi-frozen Spin Method for EDM Deuteron Search, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/papers/mopwa044.pdf>

А.Е. АКСЕНТЬЕВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ
Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

КРИТЕРИИ УСПЕШНОСТИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭДМ В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ С “ЗАМОРОЖЕННЫМ СПИНОМ”

Вводится понятие “замороженного спина”; формулируются основные критерии успешности метода измерений электрического дипольного момента (ЭДМ) в накопительном кольце с “замороженным спином”; в рамках сформулированной структуры, анализируются два магистральных подхода к измерению ЭДМ.

A.E. AKSENTYEV, Y.V. SENICHEV

Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia

SUCCESS CRITERIA FOR THE FROZEN SPIN STORAGE RING EDM MEASUREMENT METHODOLOGY

The concept of “frozen spin” is introduced; basic success criteria for the “frozen spin” method of searching for a particle electric dipole moment (EDM) in a storage ring are formulated; two major approaches to measuring the EDM are analysed with respect to the formulated criteria.

Динамика спин-вектора \mathbf{s} в электромагнитном поле (\mathbf{E} , \mathbf{B}) описывается уравнением Томаса-Баргманна-Мишеля-Телегди

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = \mathbf{s} \times \boldsymbol{\Omega},$$

где $\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Omega}_{MDM} + \boldsymbol{\Omega}_{EDM}$. Первое слагаемое здесь связано с магнитным дипольным моментом, а второе с электрическим. При измерении ЭДМ методом “замороженного спина” стремятся подавить МДМ спин-прецессию частиц пучка ($\boldsymbol{\Omega}_{MDM} \rightarrow \mathbf{0}$); в этом случае, в отсутствие ЭДМ, ориентация спин-векторов частиц зафиксирована (“заморожена”) относительно направления вектора импульса референсной частицы *в каждый момент времени*. Таким образом, изменение ориентации вектора поляризации пучка со временем сигнализирует о $\boldsymbol{\Omega}_{EDM} \neq 0$, а следовательно — о ненулевом ЭДМ.

Успешность метода измерений зависит от ответов на следующие вопросы:

1. На основании чего делаются выводы о величине ЭДМ?
2. Каким образом решается проблема разделения МДМ и ЭДМ компонент спин-прецессии? Отдельного рассмотрения требуют: (а) ортогональные и (б) сонаправленные с ЭДМ компоненты.

3. Как решение проблемы МДМ спин-прецессии отражается на стабильности оси прецессии спина?

4. Проблемы, возникающие на уровне поляриметрии: (а) зависимость анализирующей способности детектора от пространственной ориентации пучка; (б) зависимость сечения взаимодействия пучка и мишени от энергии пучка.

5. Позволяет ли метод использовать нелинейные элементы для подавления спин-декогеренции? (Этот критерий ограничивает методы с точки зрения использования двух поляризованных пучков одновременно.)

Отвечая на первый вопрос, методы измерения ЭДМ, в основе которых лежит использование состояния “замороженного спина,” можно разделить на две категории: основанные на измерении фазы (при этом, $\Omega_{MDM} \approx 0$), либо частоты ($\Omega_{MDM} \approx (\Omega_r, 0, 0)$) колебаний вертикальной компоненты поляризации пучка.

Примером “фазового” метода служит [1]. Проблема МДМ спин-прецессии решается путём её полного подавления до требуемого уровня. При этом величина вертикальной компоненты поляризации зависит от времени линейно:

$$P_v = P \frac{\omega_{EDM}}{\Omega} \sin(\Omega t + \theta_0) \approx P \omega_{EDM} t.$$

Таким образом, набег фазы колебаний за один измерительный цикл прямо пропорционален величине ЭДМ.

Ввиду малости предполагаемого значения $|\Omega_{EDM}| \ll 1$, определяемая только им ось прецессии спина становится чувствительной к малейшим возмущениям электромагнитных полей; в том числе, за счёт бетатронных колебаний самих частиц пучка. Необходимость измерения малых углов отклонения вектора поляризации от плоскости замкнутой орбиты ставит трудную задачу для поляриметрии. [2, стр. 6] Метод позволяет использование нелинейных элементов для подавления спин-декогеренции.

Альтернативный подход состоит в сравнении совокупной (МДМ+ЭДМ) частоты прецессии спина вокруг некоторого выделенного направления, в двух случаях: когда МДМ и ЭДМ компоненты складываются с одним знаком, и когда с разными. Примером может являться метод [3].

Поскольку в частотном подходе спин-векторы прецессируют с достаточно высокой угловой скоростью, ось прецессии спина теряет чувствительность к случайным возмущениям. Также, это упрощает задачу поляриметрии, с точки зрения анализирующей способности детектора.

Увеличение сонаправленной с Ω_{EDM} компоненты Ω_{MDM} решает проблему ортогональных компонент Ω_{MDM} ; решение проблемы исключения сонаправленной с ЭДМ компоненты в методе [3] требует наблюдения за вертикальным разделением замкнутых орбит двух, одновременно циркулирующих в кольце пучков, ЭДМ частиц одного измеряется, а второй используется в качестве магнетометра. Существуют альтернативные подходы, [4] основанные на измерении только частоты прецессии.

Метод [3] не позволяет использование нелинейных элементов для решения проблемы спин-декогеренции, поскольку он предполагает слабую фокусировку, при которой бета-функции частиц практически не варьируют. Необходимость использования двух пучков частиц разного сорта с замкнутыми орбитами одного радиуса накладывает ограничения на энергию инжекции поляризованного пучка, и значит на сечение взаимодействия.

Список литературы

1. Anastassopoulos D, *et al.*, AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the $10^{-29} e \cdot cm$ level. BNL Report, 2008.
2. Mane S R, arXiv:1509.01167 [physics.acc-ph]
3. Koop I A, 2015 *Phys. Scr.* **2015** 014034
4. Senichev Y, Aksentev A, Ivanov A, Valetov E, arXiv:1711.06512 [physics.acc-ph]

А.А. ЗАВАДЦЕВ, Д.А. ЗАВАДЦЕВ, О.А. ПЕРЕВОЗЧИКОВА,
Д.В. ЧУРАНОВ

*ООО «Нано Инвест», Москва, Росси
²Институт ядерных исследований РАНя*

СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ КЛИСТРОНА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОПЕРЕЧНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ XFEL

Рассмотрены результаты создания и испытания твердотельного модулятора, включающего импульсный трансформатор, для питания клистрона THALES TV2002DOD. Модулятор и клистрон входят в состав системы поперечного отклонения пучка TDS BC1, предназначенной для диагностики пучка ускоренных электронов. Основные параметры модулятора: $U=260$ кВ, $I=265$ А, $\tau=6$ мкс. Модулятор протестирован на испытательном стенде в DESY с клистроном в диодном режиме в качестве нагрузки при полных проектных параметрах.

A.A. ZAVADTSEV¹, D.A. ZAVADTSEV^{1,2},
O.A. PEREVOZCHIKOVA^{1,2}, D.V. CHURANOV^{1,2}

*¹Nano Invest, LLC, Moscow, Russia
²Institute for Nuclear Research of RAS*

HIGH-VOLTAGE PULSE POWER SUPPLY SYSTEM FOR KLYSTRON IN TRANSVERSE DEFLECTING SYSTEM OF FREE- ELECTRON LASER XFEL

The results of building and testing a solid-state modulator that includes a pulse transformer for powering the THALES TV2002DOD klystron are considered. The modulator and the klystron are parts of a Transverse Deflecting System TDS BC1 designed for electron beam diagnostics. The main parameters of the modulator: $U=260$ kV, $I=265$ A, $\tau=6$ μ s. The modulator was tested on a test stand at DESY with a klystron in diode mode as a load at full design parameters.

Система поперечного отклонения пучка TDS BC1 создана совместно с ИЯИ РАН для диагностики параметров пучка ускоренных электронов в ускорителе Лазера на свободных электронах XFEL.

Модулятор построен по схеме Аркадьева, в которой в качестве коммутаторов использованы транзисторы IGBT. Модулятор включает 4 модуля, каждый из которых выдает напряжение 11 кВ. Модулятор имеет два выхода ± 22 кВ@1450 А. Два напряжения ± 22 кВ подаются на первичную обмотку импульсного трансформатора, со вторичной обмотки которого напряжение 260 кВ подается на клистрон THALES TV2002DOD с импульсной мощностью 24 МВт. Модулятор также обеспечивает питание подогревателя клистрона

34 В@23 А и быструю блокировку, которая в случае пробоя отключает высокое напряжение за время 1.5 мкс внутри импульса и ограничивает ток клистрона на уровне 400 А.

Модулятор позволяет регулировать выходное напряжение, длительность и частоту следования импульсов в полном диапазоне.

Получена проектная форма импульса выходного напряжения на клистроне с параметрами: фронт 1.1 мкс, спад 1.3 мкс, неравномерность вершины <0.6%.

Система импульсного высоковольтного питания на стенде в DESY показана на рис.1.



Рис. 1. Система импульсного высоковольтного питания

Измеренная форма импульсов напряжения и тока на клистроне показана на рис.2.

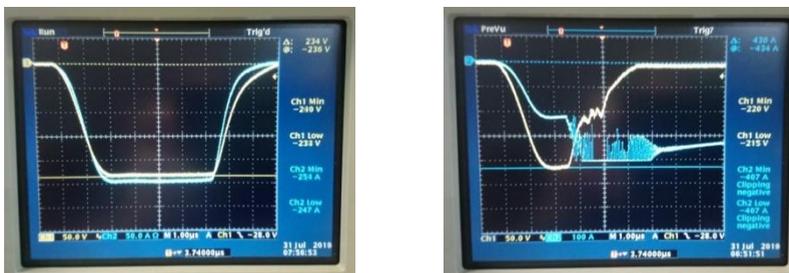


Рис. 2. Форма импульсов напряжения (белый) и тока (синий) на клистроне в нормальном режиме работы (слева) и в случае пробоя (справа)

А.П. ДУРКИН¹, А.А. КОЛОМИЕЦ, В.В.ПАРАМОНОВ¹

¹-ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НА ФОКУСИРОВКУ ПРОТОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ В УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ НА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ

При ускорении протонов на обратной гармонике $n=-1$ бегущей волны более быстрая основная гармоника $n=0$ имеет превышающую амплитуду поля и влияет на фокусировку пучка. В работе оценивается добавочная фокусировка быстрой гармоникой ускоряющей структуры S диапазона при ускорении на бегущей волне пучка протонов с энергией свыше 15 МэВ.

A.P. DURKIN¹, A.A. KOLOMIETS, V.V.PARAMONOV¹

¹*Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia*

INVESTIGATION OF THE SECOND HARMONIC INFLUENCE ON FOCUSING OF MODERATE ENERGY PROTONS IN TRAVELLING WAVE ACCELERATING STRUCTURE

For proton acceleration in traveling wave mode with backward $n=-1$ spatial harmonic the faster main harmonic, having larger field amplitude, influences on proton beam focusing. In the report an additional focusing by faster main harmonic is estimated during acceleration of proton beam with energy above 15 MeV and traveling wave accelerating structure in the S band frequency range.

Возможность одновременного обеспечения продольной и поперечной устойчивости сгустков ускоряемых частиц при ускорении в поле двух гармоник активно исследовалась для ускорения тяжелых ионов малой энергии в метровом диапазоне длины рабочей волны, [1]. Было показано, [2], что при определенных условиях в поле медленной ускоряющей и быстрой фокусирующей гармоник можно одновременно реализовать условия продольной и поперечной устойчивости сгустков. В работе [3] было предложено реализовать такой режим при ускорении протонов средних энергий в поле бегущей волны на обратной гармонике $n=-1$ в структуре S диапазона. Это позволяет сохранить достаточно высокую ВЧ эффективность ускорения.

Дальнейшие исследования показали, что при ускорении на высокой частоте в диапазоне средних энергий эффект фокусировки, зависящий от отношения l/b , уменьшается на порядки и обеспечение поперечной устойчивости только полем быстрой гармоник в предлагаемом режиме [3] невозможно. Поэтому требуется оценить, насколько может ослабеть дефокусировка ускоряющим полем, чтобы использовать это при выборе необходимых полей в квадрупольных линзах.

В двух волновом приближении напряженность ускоряющего поля Ez

$$E_z = E_{-1} \cos(Y + j_s) + E_0 \cos(Y + j_s + \frac{2pz}{D_{-1}}), Y = \omega t - k_{-1} z,$$

где j_s – синхронная фаза, D_{-1} , ω и k_{-1} – частота и волновое число ускоряющей гармоники. В линейном приближении поперечное движение синхронных частиц определяется компонентами электрического и магнитного поля:

$$E_r - b B_j = (- E_{-1} \frac{2p}{bl g^2} \sin(j_s) + E_0 \frac{2p}{bl} (\frac{q}{2p - q} + b^2) \sin(j_s + \frac{2pz}{D_{-1}})) \frac{r}{2},$$

где q и l – вид и длина волны. При учете второй гармоники вместо постоянной фокусирующей силы мы получаем периодическую. Матрицы преобразования на периоду в одно и двух волновом приближениях имеют вид

$$\begin{array}{cc} \begin{array}{c} \text{Ж} \\ \text{II} \end{array} ch(\sqrt{a}) & \frac{sh(\sqrt{a})}{\sqrt{a}} \begin{array}{c} \text{II} \\ \text{Ж} \end{array} \\ \frac{sh(\sqrt{a})}{\sqrt{a}} \begin{array}{c} \text{II} \\ \text{Ж} \end{array} & ch(\sqrt{a}) \begin{array}{c} \text{II} \\ \text{Ж} \end{array} \end{array}, \dots, \begin{array}{cc} \begin{array}{c} \text{Ж} \\ \text{II} \end{array} ch(\sqrt{m}) & \frac{sh(\sqrt{m})}{\sqrt{n}} \begin{array}{c} \text{II} \\ \text{Ж} \end{array} \\ \frac{sh(\sqrt{m})}{\sqrt{n}} \begin{array}{c} \text{II} \\ \text{Ж} \end{array} & ch(\sqrt{m}) \begin{array}{c} \text{II} \\ \text{Ж} \end{array} \end{array}$$

где a – это обычный параметр дефокусировки а отношение $a/m > 1$ характеризует ослабление дефокусировки.

Анализ решений уравнения Матве показывает, что при практически реализуемом в ускоряющей структуре отношении $E_0/E_{-1} < 5$ и темпе ускорения $E_{-1} > 6$ МэВ/м существенного уменьшения дефокусировки в интересующем режиме ускорения на высокой частоте протонов средних энергий не происходит. Для этого нужна существенно, на порядки, большая величина отношения E_0/E_{-1} .

Список литературы

1. В.К. Баев, В.М. Гаврилов, С.А. Минаев, А.В. Шальнов. Линейные резонансные ускорители ионов с фокусировкой осесимметричным ускоряющим полем. ЖТФ, т. 53, стр. 1287, 1983.
2. В.К. Баев, С.А. Минаев. Эффективность фокусировки в линейном ускорителе полем бегущей волны. ЖТФ, т. 51, стр. 2310, 1981.
3. В.В. Парамонов, Возможные параметры ускорения протонов на обратной гармонике бегущей волны. Письма в ЭЧАЯ, т.13, в. 6, стр. 1404, 2016

В.В.ПАРАМОНОВ

ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН», Москва, Россия

ОСОБЕННОСТЬ ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ “ЗАМКНУТОЕ КОЛЬЦО”

В отличие от обычной линейной бипериодической цепочки связанных ячеек, замкнутая в кольцо бипериодическая цепочка разрешает существование в дисперсионной характеристике в два раза меньшего числа видов колебаний. На каждом виде существуют два совпадающих по частоте колебания. Замыкание в кольцо снимает действующий в линейной цепочке запрет на независимое возбуждение колебания “вида $p/2$ ” в ячейках связи. Симметричное расположение по частоте колебаний соседних с рабочим видов требует совпадения частот ячеек - ускоряющих и связи. Тогда на рабочей частоте существуют две моды “вида $p/2$ ” в ускоряющих и в ячейках связи. Приведены результаты анализа методом эквивалентных схем, и прямыми численными моделированиями распределений полей в CST.

V.V.PARAMONOV

Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, Russia

PARTICULARITY IN DISPERSION PROPERTIES OF “CLOSED RING” ACCELERATING STRUCTURE

Differing from an usual linear biperiodical chain of coupled cells, closed in a ring biperiodical chain allows excitation in dispersion curve for twice less number of types for oscillations. At each type exist two oscillations with the same frequencies. Closing into a ring cancels existing for linear chains prohibition for independent excitation of “ $p/2$ -like” mode in coupling cells. Symmetrical position in frequency of neighbor modes requires the same frequencies both for accelerating and coupling cells. This case at operating frequency exist two– “ $p/2$ -like” modes – in accelerating cells and in coupling cells. Results of lumped circuit analysis and direct CST simulations are presented.

В реализации Кольцевой Бипериодической Ускоряющей Структуры (КБУС), [1], используются как обычные, внутренние или боковые, так и Трапециидальные Инвертирующие Ячейки связи. (ТИЯС). С помощью ТИЯС связаны нечетные Ускоряющие Ячейки (УЯ), формируя одну линейную цепочку, Вторую линейную цепочку формируют четные УЯ, также связанные через ТИЯС. Первая - вторая, а также последняя - предпоследняя УЯ связаны обычными Ячейками Связи (ЯС), формируя замкнутую кольцевую цепочку связанных ячеек, в которой разрешено существование в два раза меньшего, чем в линейной цепочке, видов колебаний с увеличенным разделением по частоте.

Подробное дополнительное рассмотрение дисперсионных свойств КБУС проведено в [2]. При одинаковом коэффициенте связи k_s и равенстве частот f_a и f_s ячеек каждый вид дважды вырожден по частоте. Общее число колебаний в

КБУС равно общему числу ячеек. Замыкание в кольцо снимает действующий в линейной цепочке запрет и на рабочей частоте независимо существуют два колебания “вида $p/2$ ” - в ускоряющих ячейках и ячейках связи. Частоты вырожденных колебаний вычисляются как методом эквивалентных схем, так и в прямом численном моделировании с пакетом CST Studio, [3]. Для параметров $k_c = 2.55\%$, и $f_a = 990.98$ МГц и $f_c = 991.03$ МГц значения частот в КБУС с $N_a = 8$ ускоряющих ячеек приведены в Таблице 1. А на Рис. 1 показаны модель КБУС с $N_a = 8$ для прямого численного моделирования и распределения электрических полей независимо существующих колебаний “вида $p/2$ ” в ускоряющих ячейках и ячейках с частотами, выделенными в Таблице 1 жирным шрифтом.

Таблица 1. Частоты колебаний в КБУС с $N_a = 8$, МГц, вычисленные методом эквивалентных схем - f_e и прямым моделирование в CST- f_c .

	e	c		e	c		e	c		e	c
	78.58	78.78		82.18	82.34		91.04	91.05	3	000.06	000.12
	79.50	79.54		86.18	86.17	0	95.86	95.84	4	002.90	002.88
	79.53	79.85		86.19	86.23	1	95.87	95.85	5	002.86	003.13
	82.16	82.21		90.94	90.94	2	000.04	000.08	6	003.88	004.05

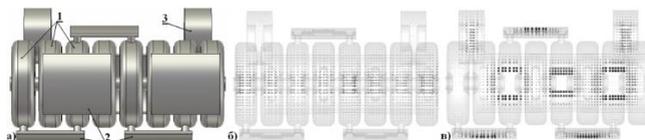


Рисунок 1. Модель КБУС для расчета в CST (а), распределения E поля колебания “вида $p/2$ ” в ускоряющих ячейках, $f = 990.88$ МГц, (б), и в ячейках связи, $f = 991.10$ МГц, (в). 1- ускоряющие ячейки, 2 – ТИАС, 3- боковые ячейки связи..

Автор благодарит лабораторию DESY за возможность расчетов на CST.

Список литературы

1. А.А. Завадцев, Б.В. Зверев. Новые ускоряющие системы для ЛУЭ со стоячей волной. Писма в ЖТФ, т. 7, в. 21, стр. 1332, 1981;
2. В.В. Парамонов, Комментарии к дисперсионным характеристикам ускоряющей структуры "замкнутое кольцо", <https://arxiv.org/pdf/1706.07268.pdf>, 2017
3. <http://www.cst.com>

Н.П. БОБЫРЬ¹, Е.Д. КАЗАКОВ^{1,2}, Д.И. КРУТИКОВ¹, А.А. КУРИЛО¹,
М.Ю. ОРЛОВ¹, А.В. СПИЦЫН¹, М.Г. СТРИЖАКОВ¹

¹ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

² *Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия*

ПИЛОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОЩНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА УСКОРИТЕЛЕ «КАЛЬМАР»

Проведены первые исследования двух типов конструкционных материалов плазменных установок при воздействии сильноточного электронного пучка на установке «Кальмар». Подобраны параметры воздействия пучка, близкие к аварийным режимам некоторых типов плазменных установок.

N.P. BOBYR¹, E.D. KAZAKOV^{1,2}, D.I. KRUTIKOV¹, A.A. KURILO¹,
M.YU. ORLOV¹, A.V. SPITSYN¹, M.G. STRIZHAKOV¹

¹ *National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

² *National Research University MPEI, Moscow, Russia*

A PILOT STUDY OF THE BEHAVIOR OF STRUCTURAL MATERIALS UNDER POWERFUL PULSE INFLUENCE ON THE “CALAMARY”

The first studies of two types of structural materials of plasma systems under the influence of a high-current electron beam at the Kalmar installation were carried out. Beam exposure parameters close to the emergency modes of some types of plasma systems are selected.

При аварийных ситуациях на мощных плазменных установках на стенку вакуумной камеры может оказываться мощное импульсное воздействие плазмы или пучков заряженных частиц (см., например [1]) с суммарным энерговыделением до десятков Дж/см². В данной работе для экспериментального моделирования подобных ситуаций предложено использовать сильноточный ускоритель электронов «Кальмар», применявшийся ранее для исследования стойкости полимерных и композитных материалов к мощному потокам ионизирующего излучения. Преимуществом данной установки является оснащенность достаточно широко спектром диагностик, позволяющих достаточно точно регистрировать уровень воздействия и влияние различных факторов [2].

В проведенном исследовании образцы размером 10x10 мм² из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и ферритно-мартенситной коррозионностойкой стали ЭК-181 (Русфер) облучались электронным пучком электронов с энергией до 200 кэВ при суммарном энерговыделении до 100

Дж/см². На рисунке 1 представлен ход мощности, выделявшейся в приповерхностном слое образцов и фотографии после облучения.

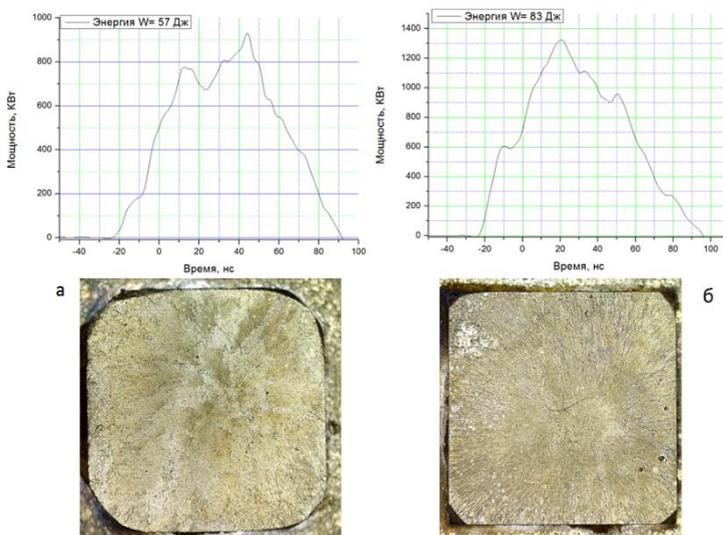


Рис.1 – Временной ход мощности облучения и внешний вид облученных образцов из стали (а) и вольфрама(б).

Видно, что образцы из стали подвергаются существенно большему разрушению, а на поверхности кроме капель закипевшего материала наблюдаются микротрещины. На следующем этапе для создания более равномерного потока планируется провести работу по выбору оптимальной формы и материала катода.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ № 1570 от 16.07.2019).

Список литературы

1. Мартыненко Ю.В., Будаев В.П., Грашин С.А., Шестаков Е.А.// Краткие сообщения по физике ФИАН. 2017. №6. С. 45–52.
2. Demidov V.A., Efremov V.P., Kalinin Yu.G. et.al// Journal of Physics: Conference Series. 2016. 774(1),012129

С.Н.АНДРИАНОВ

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЯХ

В статье рассмотрены методы и инструменты компьютерной алгебры, позволяющие существенно повысить вычислительную эффективность процессов моделирования динамических систем (на примере решения нелинейных задач в физике динамики пучков частиц в ускорительных комплексах). Описаны как разработанное программное обеспечение, так и особенности параллельных и распределенных вычислительных экспериментов.

S.N.ANDRIANOV

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

COMPUTER ALGEBRA METHODS IN MODELING THE DYNAMICS OF PARTICLE BEAMS IN ACCELERATORS

The article discusses the methods and tools of computer algebra, which can significantly increase the computational efficiency of the processes of modeling dynamic systems (by the example of solving nonlinear problems in the physics of particle beam dynamics as in accelerators and in accelerator complexes). Both developed software and features of parallel and distributed computing experiments are described.

Современные ускорительные установки представляют собой сложные системы, обеспечивающие необходимую эволюцию пучка. Особое внимание в современных ускорительных центрах и лабораториях уделяется повышению эффективности процессов, как моделирования, сопровождения, так и разработки новых установок. требования, предъявляемые к современным установкам, приводят к необходимости модификации существующих и разработке как новых математических методов, так и новых информационных технологий с целью обеспечения повышения вычислительной эффективности соответствующих исследований, повышения точности и необходимой корректности результатов вычислительных процедур. С учетом необходимости модификации существующих ускорительных систем и комплексов и создания новых, особое внимание уделяется разработке вычислительно эффективных и корректных как математических, так и программных методов. Кроме того, особое внимание необходимо уделять как проблемам вычислительной эффективности проводимых вычислительных экспериментов, так и технологиям разработки вычислительно эффективного программного обеспечения, так и сопровождения процессов анализа, синтеза и оптимизации систем управления с целью повышения «качества» пучка частиц. Следует особо отметить, что предлагаемый в работе подход базируется на концепции виртуальных объектов,

формирование (разработка) которых, организация соответствующих вычислительных процедур, а также поиск оптимальных решений.

В данной работе в качестве базового инструмента математических моделей ускорительных систем используется концепция «матричного формализма» [1]. Соответствующее программное обеспечение позволяет не только «следить» за эволюцией всего пучка, формировать оптимальное управление, обеспечивающее заданные свойства пучка, но и гарантировать сохранение фундаментальных свойств, например, свойства симплектичности. Использование подобного подхода позволяет, как настраивать систему управления ускорителем, так и формировать базы данных блоков (элементов), используемых в рамках концепции LEGO объектов [2]. Следует также отметить, что в нашем случае (в отличие от [3]) концепция LEGO объектов базируется на матричном формализме и позволяет «конструировать» различные варианты как подсистем ускорителя, его составляющих, например, методов «склейки» используемых объектов в различные управляющие элементы, так и формирования управляющих элементов. Следует также отметить, что данный формализм позволяет формировать различные комплексы управляющих элементов и использовать полученные данные в параллельных потоках в случае однотипных операций и распределенных в случае различных (например, по объемам вычислительных потоков) операций. Реализованные прототипы описанных элементов распределенной системы управления существенно повышают эффективность выполняемых вычислительных операций. Проведены исследования возможности использования методов нейронных сетей и концепции мультиагентных систем. Полученные результаты продемонстрировали достаточную эффективность, что позволит (с использованием соответствующих инструментариев) существенно повысить вычислительную эффективность реализуемых операций.

Список литературы

1. Андрианов С.Н. Динамическое моделирование систем управления пучками частиц. Издательство СПбГУ, 2004, Р. 368.
2. S.N.Andrianov, LEGO-technology approach for beam line design. Proc. of EPAC 2002, Paris, France
3. Y.Cai, M.Donald, J.Irwin, Y.T.Yan LEGO: A modular accelerator design Code. SLAC, Stanford University, Stanford, CA 94309 USA 1997

П.А. ФЕДИН^{1,3}, А.В. ЗИЯТДИНОВА^{1,3}, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ^{1,2}, Р.П. КУЙБИДА^{1,3}, А.А. НИКИТИН^{1,2}, С.В. РОГОЖКИН^{1,2}, Т.В. КУЛЕВОЙ^{1,3}

¹НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

ТРЕБОВАНИЯ К КОМБИНИРОВАННОМУ ПУЧКУ Fe + H/He НА УСКОРИТЕЛЕ ТИПр ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Имитационные эксперименты по облучению тяжелоионными пучками конструкционных сталей, которые моделируют повреждения, вызываемые нейтронным облучением, востребованы в качестве экспресс-анализа радиационной стойкости материалов. Такие эксперименты ведутся в НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ на ускорителе тяжелых ионов ТИПр. В рамках совершенствования экспериментов планируется создание второго канала на ускорителе ТИПр для одновременного облучения тяжелыми ионами и ионами H и He. В докладе представлены результаты моделирования с помощью пакета SRIM для определения энергии и угла облучения пучками ионов H и He.

P.A. FEDIN^{1,3}, A.V. ZIATDINOVA^{1,3}, K.E. PRYANISHNIKOV^{1,2}, R.P. KUIBEDA^{1,3}, A.A. NIKITIN^{1,2}, S.V. ROGOZHNIKIN^{1,2}, T.V. KULEVOY^{1,3}

¹NRC "Kurchatov institute" – ITEP, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

³NRC "Kurchatov institute", Moscow, Russia

REQUIREMENTS FOR THE COMBINED BEAM Fe + H / He AT THE ACCELERATOR HIPR FOR SIMULATION OF NEUTRON INFLUENCE

Simulation experiments on irradiation with heavy-ion beams of structural steels are in demand as an express analysis of the radiation resistance of materials. At the NRC "Kurchatov Institute" - ITEP the experiments are being conducted the HIPr heavy-ion accelerator. As part of the improvement of experiments, it is planned to create a second channel at the HIPr accelerator for simultaneous irradiation with heavy ions and H and He ions. The report presents the results of modeling using the SRIM software package, which determined the energies and the angle of irradiation with H and He ion beams.

Облучение ионами может использоваться для экспресс-анализа радиационной стойкости реакторных материалов. При этом ионное облучение не активизирует материалы и позволяет набирать дозы радиационных повреждений в кратчайшие сроки. В НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ на тяжелоионном ускорителе ТИПр отработана методика облучения образцов импульсным пучком ионов металлов с энергией 101 кэВ/нуклон. В рутинном режиме выполняются сеансы облучения ионами Fe²⁺ с энергией 5,6 МэВ до

флюенсов $\sim 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при температурах образцов до 500°C [1]. Имплантация ионов водорода и гелия позволяет моделировать процессы накопления газовых продуктов ядерных реакций, помимо радиационных дефектов от тяжелоионного облучения. Причем необходимо, чтобы процессы образования радиационных эффектов дефектов и накопления водорода/гелия проходили одновременно [2]. Для этого планируется создание дополнительного канала к каналу ускорителя ТИПр для одновременного облучения образцов тяжелыми ионами и ионами Н и Не. Интересующая область повреждений от ионов железа энергией $\sim 5 \text{ МэВ}$ для анализа радиационных эффектов, находится на глубине 300 - 1000 нм. Эта область с одной стороны ограничена поверхностными эффектами, а с другой - областью внедрения ионов железа [3].

Целью работы является определение энергий и углов падения пучков ионов Н и Не для создания профилей имплантации на требуемых глубинах при одновременном облучении пучком Fe^{2+} с энергией 5,6 МэВ. Моделирование проводилось с помощью пакета программ SRIM (см. рис. 1).

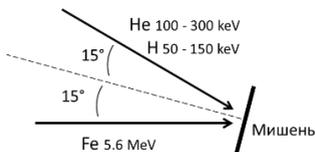


Рис. 1. Планируемая схема облучения.

В качестве инжектора второго канала планируется использовать источник типа ЭЦР на высоковольтной платформе 50 – 150 кВ для генерации H^+ с энергией до 150 кэВ и He^+ , He^{++} с энергией до 300 кэВ. Показано, что варьируя ускоряющее напряжения с шагом 25 кВ во время облучения можно будет получить совпадающий профиль имплантации с профилем повреждений на глубинах 300-650 нм.

Список литературы

1. Fedin P.A. and others// 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1115 032026
2. Fluss M. et al. //Lawrence Livermore National Laboratory. – 2009.
3. S.J. Zinkle, L.L. Snead// Scripta Materialia 143 (2018) 154

Р.П. ПЛЕШАКОВА¹, А.В. ИЛЬИНСКИЙ¹, А.А. ИСАЕВ²,
К.И. КОЗЛОВСКИЙ², Е.А. ШИКАНОВ¹

*Институт геофизических и радиационных технологий МАН ВШ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАПЯЯННЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК НА БАЗЕ ДИОДОВ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Рассмотрены технологические схемы, и возможности их реализации для изготовления двух типов запаянных вакуумных ускорительных трубок для генерации нейтронов на базе диодов с магнитной изоляцией электронного компонента. В первом конструктивном варианте трубки постоянный магнит в виде втулки с продольной намагниченностью, расположен в вакуумном объеме ДМИ. Во втором варианте - спиральная линия, создающее импульсное магнитное поле.

R.P. PLESHAKOVA, A.V. ILYINSKIY, K.I. KOZLOWSKIY,
A.A. ISAEV, E.A. SHIKANOV,

*Institute of Geophysical and Radiation Technology of IA SHS, Moscow, Russia
National Research Nuclear University «МЭФТИ», Moscow, Russia*

TECHNOLOGY POSSIBILITIES For REALISATION of the SEALD-Off ACCELERATION TUBES ON THE BASE OF DIODE WITH MAGNETIC ISOLATION

The schemes of technologies describing the producing sealed-off accelerating tubes for neutron generating on the basis diode with magnetic insulating and possibilities of their realization are proposing in this work. One of the constructions of tube use of the system for suppress electron conductivity due to the permanent magnetic field. It is applying inside vacuum volume of tube. Another one consists the system for suppress electron conductivity by pulsed magnetic field created by spiral line placed inside tube.

В докладе рассматриваются технологические схемы изготовления запаянных ускорительных трубок на базе малогабаритных вакуумных диодов с магнитной изоляцией (УТ с ДМИ). Во всех конструкциях такого типа УТ предполагается использовать лазерные источники ионов (ЛИ). Технология изготовления лазерных нейтронных трубок (ЛНТ) и ее особенности подробно изложены в работе [1]. Указанные трудности в реальном производстве ЛНТ: наличие нейтронно-образующей мишени (М) сложной конфигурации, окна для ввода лазерного излучения в трубку, были решены.

В нашем случае большой проблемой при разработке технологической схемы стало наличие постоянного магнита, размещенного внутри вакуумного объема трубки. Перед монтажом постоянного магнита в УТ он, как и все детали и узлы, должен проходить операцию термообработки на вакуумном посту, однако, при этом он может

размагнититься при прохождении точки Кюри. Этот вопрос может быть рассмотрен отдельно с использованием результатов экспериментального исследования УТ с ИИ, внутри которого закреплен постоянный магнит [3], что вселяет уверенность в возможности реализовать схожую технологию для УТ с ДМИ. Например, можно рассмотреть возможность помещения собранной УТ в намагничивающее устройство уже после термообработки. Чтобы сформулировать требования к величине магнитного поля и размерам магнита, были проведены расчеты оптимального значения индукции магнитного поля (B) в зависимости от геометрии электродов [2]. Величина B , необходимая для подавления электронной проводимости, лежит в пределах 100-600 мТл, что требует увеличения массы и размеров, но их внешний диаметр ограничен диаметром УТ.

При разработке другой технологической схемы изготовления УТ с ДМИ со спиральной линией, создающей магнитное поле для подавления электронной проводимости при разряде на нее электрической емкости [4], возникла сложность, связанная с созданием герметичных электрических вводов для соединения спирали с этой емкостью. Исходя из успешного технологического опыта разработки УТ, предназначенных для генерации нейтронов и рентгеновских квантов, предлагается следующая технологическая схема. После всех операций, традиционно необходимых при изготовлении УТ, следует операция сборки баллона - монтаж в корпус мощных выводов, на которые монтируется спираль-заготовка из нихрома, затем выполняются все операции, как в обычных технологических схемах, разработанных для изготовления УТ, включая процесс прогрева при температуре 400 °С в течение 4 ч под откачкой. Потом следуют операции высоковольтной тренировки и отпайки от откачного поста.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по соглашению № 05.605.21.0182 П(RFMEFI60519X0182).

Список литературы

1. Беспалов Д.Ф., Плешакова Р.П., Рябов Е.В. и др. Технологические особенности изготовления ускорительных нейтронных трубок с лазерным (ЛНТ-2М) и вакуумно-дуговым (ДИН-1) ионными источниками для геофизических исследований. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Радиационная техника, в.1(41), 1990, с.30-33.
2. Анурова Н.К., Плешакова Р.П., Шиканов А.Е. и др. Импульсная нейтронная трубка. Пат. N1632249 от 03.07.1989.
3. Плешакова Р.П., Бессарабский Ю.Г., Пресняков Ю.К. и др. Исследование возможности улучшения стабильности работы частотных нейтронных трубок, Вакуумная техника и технология, т.13, N 1, 2003, с.31-34.
4. Kozlovskiy K.I., Ryzhkov V.I., Shikanov A.E. et. al. Atomic Energy, 112(4). p.218-221.

Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.Р. КАРИМОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ,
М.И. ЛИСОВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ, А.Е. ШИКАНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ИОННОМ ДИОДЕ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Предложен алгоритм расчета магнитного поля в системе подавления электронной проводимости малогабаритного ионного диода для генерации нейтронов. Эта система представляет собой коническую спираль, расположенную в полости цилиндрической нейтроно-образующей мишени диода. Для создания изолирующего магнитного поля на спираль разряжалась электрическая емкость.

E.D. VOVCHENKO, A.R. KARIMOV, K.I. KOZLOWSKII,
M.I. LISOVSKII, V.I. RASHCHIKOV, A.E. SHIKANOV

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

ESTIMATION OF A PULSED MAGNETIC SYSTEM FOR SUPPRESSING ELECTRON CONDUCTIVITY IN ION DIODE USED FOR NEUTRON GEneration

It is proposed the algorithm for estimating the magnetic field in the suppression system of electron conductivity in a small-sized ion diode used for neutron generation. The suppression of electron conductivity is carried out in a conical spiral located in the cavity of a cylindrical neutron-forming diode target. In this system we used the discharge of electric capacity in the spiral for creating the insulating magnetic field.

В работах [1,2] исследовалось подавление магнитным полем спиральной линии электронной эмиссии с поверхности цилиндрической нейтроно-образующей мишени в коаксиальных ионных диодах для генерации нейтронов. Результаты этих исследований указывают на перспективность применения подобных систем подавления в разрабатываемых импульсных генераторах нейтронов (ИГН) с лазерным источником дейтронов [3].

Разработка и проектирование таких ИГН потребовали разработки алгоритма и компьютерной программы для расчета магнитных полей в указанных импульсных системах подавления электронной проводимости.

В разработанном алгоритме использовалась система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами вида:

$$\mathbf{Z}(C, L_s, L_i, L_{s,i}, L_{i,j}) \frac{d}{dt} \mathbf{Y} = \mathbf{G}(\Sigma_s, \Sigma_i) \mathbf{Y}, \quad (1)$$

в которой компонентами вектора $\mathbf{Y}(t)$ являются зависимости от времени напряжения на емкости C , разряжаемой на спиральный электрод, тока в спирали и токов в N отдельных кольцевых фрагментах с номерами $i=1 \dots N$, на которые условно разбивается мишень ИНГ. В качестве начальных условий выбиралось исходное зарядное напряжение на накопительной емкости и нулевые значения токов. Элементами матриц \mathbf{Z} и \mathbf{A} служили емкость C , индуктивности

$$L_{s,i} = \frac{\mu_0}{4\pi I_{s,i}^2} \int_{V_{s,i}} dV \int_{V_{s,i}} dV_0 (\mathbf{j}_{s,i}(\mathbf{r}), \mathbf{j}_{s,i}(\mathbf{r}_0)) |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^{-1}$$

спирали и фрагментов мишени, взаимные индуктивности

$$L_{s,i,j} = \frac{\mu_0}{4\pi I_{s,i} I_{i,j}} \int_{V_{s,i}} dV \int_{V_{i,j}} dV_0 (\mathbf{j}_{s,i}(\mathbf{r}), \mathbf{j}_{i,j}(\mathbf{r}_0)) |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^{-1}$$

спирали и i -го фрагмента, i -го и j -го фрагмент, а также проводимости Σ_s, Σ_i этих элементов. В формулах введены обозначения μ_0 - магнитная постоянная, $I_{s,i}$, $\mathbf{j}(\mathbf{r})_{s,i}$ - токи и плотности токов в спирали и фрагментах мишени, $V_{s,i}$ - объемы спирали и i -го фрагмента мишени.

Магнитное поле рассчитывалось по формуле Ампера на базе решения системы (1). Затем осуществлялось моделирование динамики частиц в ионном диоде по методике, используемой авторами в работе [4]. Расчеты подтвердили эффективность магнитной изоляции и возможность использования алгоритма при проектировании диодов для генерации нейтронов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ по соглашению № 05.605.21.0182 (RFMEFI60519X0182).

Список литературы

1. Gul'ko V.M., Kozlovskii K.I., Shikanov A.E. et. al. Isolation of electron conductivity of a coaxial ion diode by the pulsed magnetic field of a spiral line. Radiophysics and Quantum Electronics, 1990, 33(8), pp.710-713.
2. Kozlovskij K.I., Ryzhkov V.I., Shikanov A.E. et. al. Experimental study of neutron generator with pulsed magnetic insulation. Atomic Energy, 2012, 112(3). pp. 218-221.
3. Anan'in O.B., Kozlovskij K.I., Tsybin A.S., Shikanov A.E. Prospects for developing laser neutron generator. Atomic Energy, 2013, 115(2), pp.137-141.
4. Shikanov A.E., Kozlovskij K.I., Rashchikov V.I. et. al. Model for Generation of Neutrons in a Compact Diode with Laser- Plasma Anode and Suppression of electron Conduction by a Permanent Magnet. 2018, Technical Physics, 63(4), pp.511-518.

В.П. ЕФРЕМОВ¹, А.Д. КИВЕРИН¹, И.С. ЯКОВЕНКО¹,
Е.Г. БАЛДИНА², А.А. БАЛДИН², В.В. БЛЕКО²

¹*Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия*

²*Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БОЛЬШОЙ УРАНОВОЙ МИШЕНИ «БУРАН» ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПРОТОНОВ

Статья посвящена анализу теплопереноса, гидродинамических и акустических процессов вызванных облучением большой урановой мишени «БУРАН» высокоэнергетическими частицами. Генерация тепла и акустических волн релятивистским пучком ионов воспроизведена численно. Перераспределение энергии между облучаемой мишенью и окружающей атмосферой проанализировано в рамках нескольких различных моделей. Исследование представляет собой основу нового акустического метода анализа энерговклада пучком ионов и его последующего распределения внутри мишени.

V.P. EFREMOV¹, A.D. KIVERIN¹, I.S. YAKOVENKO¹,
E.G. BALDINA², A.A. BALDIN², V.V. BLEKO²

¹*Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

MODELING OF HEAT AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE BIG URANIUM TARGET "BURAN" UNDER THE ACTION OF HIGH-ENERGY IONS

This paper is devoted to the analysis of heat transfer, hydrodynamic and acoustic processes induced by high-energy particles irradiating the big uranium target "BURAN". The generation of heat and acoustic waves by relativistic ion beams is studied numerically. Energy transfer between irradiated target and ambient atmosphere was analyzed with different models. The study provides a basis for development of the new acoustic method for analysis of ion beam energy deposition and its further redistribution in the bulk of a target.

Атомная энергетика представляет собой достаточно привлекательную альтернативу традиционной энергетике, основанной на сжигании органического топлива. Основной причиной ограничивающей развитие атомной энергетике в мире является необходимость решения задач безопасности и хранения и утилизации отработанного ядерного топлива и отходов. Среди предлагаемых подходов к утилизации отработавшего ядерного топлива особый интерес привлекают электроядерные или ADS-системы (Accelerator-driven System), которые представляют собой быстрые субкритические реакторы с внешним источником нейтронов. ADS-системы обладают рядом преимуществ, таких как,

безопасность, трансмутация минорных актинидов в ядерных отходах, короткий (по сравнению с быстрыми реакторами) цикл очистки топлива от продуктов деления, и другие [1].

Перспективная концепция ADS-систем на легких пучках электронов [2], значительно снижающая требования к ускорительной части, требует тщательного анализа спектра нейтронов, генерируемого в мишени при облучении пучками заряженных частиц. Экспериментальные исследования данных спектров сегодня проводятся на большой урановой мишени «Буран» ОИЯИ РАН. В настоящей работе представлен численный анализ прогнозируемых термических, гидродинамических и акустических процессов в мишени (см. рис. 1). Впервые продемонстрировано, что в зависимости от характера поглощения и перераспределения энергии в мишени, определяемого энергией частиц в пучке и материалом конвертера, наблюдается изменение параметров акустических полей, регистрируемых на поверхности мишени. Полученные результаты представляют собой основу нового метода акустической диагностики энерговклада пучка ионов и его последующего распределения внутри мишени.

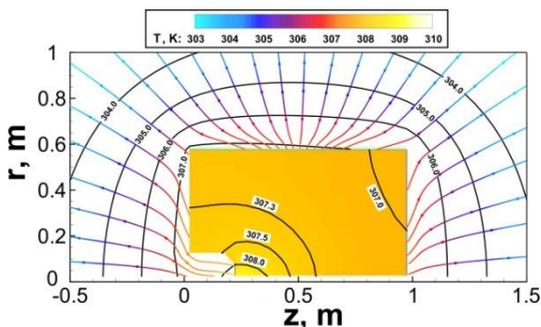


Рис. 1. Расчетное поле температуры внутри мишени облучаемой пучком протонов с энергией 0.66 ГэВ и газодинамический поток, формируемый в окружающей мишень воздухе.

Список литературы

1. Ismailov K., and others // Prog. Nucl. Energy, 2011. Vol. 53(7), P. 925-929
2. Baldin A., Baldina E., Paraipan M. // Ann. Nucl. Energy. 2017. Vol. 110, P. 973-978.

М.А. ГУЗОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ,
А.И. МАКАРОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ДИНАМИКА И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ, РАБОТАЮЩЕГО НА ЧАСТОТЕ 81,25 МГц

В докладе представлены результаты моделирования динамики пучков протонов и ионов с отношением массы к заряду A/Z от 1 до 3,2 в ускоряющей секции с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. Приведены результаты оптимизации электродинамического макета четырехкамерного резонатора с ПОКФ, с окнами магнитной связи. Рассчитаны вариационные характеристики рабочей частоты резонатора от параметров электрода. Рассмотрены электродинамические характеристики для трёх форм обечаек: прямоугольной, цилиндрической, восьмиугольной.

M.A. GUZOV, S.M. POLOZOV, Yu.Yu. LOZEEV,
A.I. MAKAROV

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

DYNAMICS AND ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF ION ACCELERATOR WITH RADIO FREQUENCY QUADROUPOLE FOCUSING, OPERATING AT A FREQUENCY OF 81,25 MHZ

The report presents the results of modeling the dynamics of proton and ion beams with a mass to charge ratio A / Z from 1 to 3.2 in the accelerating section with radio frequency quadrupole focusing. The results of optimization of the electrodynamic layout of a four-vane cavity with RFQ, with magnetic coupling windows are presented. The variational characteristics of the operating frequency of the resonator from the parameters of the electrode are calculated. The electrodynamic characteristics for three form of cavity are considered: rectangular, cylindrical, octagonal.

Р. Д. ФАТКУЛЛИН¹, Д. Н. СЕЛЕЗНЁВ¹, А. И. СЕМЕННИКОВ¹,
С. Л. БОГОМОЛОВ², Т. В. КУЛЕВОЙ¹

¹НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ, Москва, Россия ²Объединенный институт
ядерных исследований – ОИЯИ, Дубна, Россия

КОМПАКТНЫЙ ЭЦР ИОННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ УСТАНОВКИ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В НИЦ “Курчатовский институт” – ИТЭФ разработана конструкция компактного ЭЦР ионного источника для установки по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов. За основу конструкции взят аналогичный источник, разработанный в ЛЯР ОИЯИ. Приведены результаты теоретического исследования параметров резонатора предлагаемого ионного источника (напряженности полей и их распределение, резонансная частота, добротность), проведено моделирование емкостной связи ввода мощности с резонатором источника.

R. D. FATKULLIN, D. N. SELEZNEV, A. I. SEMENNIKOV, S. L.
BOGOMOLOV, T. V. KULEVOY

NRC «Kurchatov Institute» - ITEP, Moscow, Russia

COMPACT ECR ION SOURCE FOR FACILITY DESIGNED TO ANALYZE RADIATION RESISTANCE OF CONSTRUCTION MATERIALS

A compact ECR ion source for proposed facility for analysis of radiation resistance of construction materials was designed at NRC «Kurchatov Institute» - ITEP. The design is based on the similar source, developed at FLNR JINR.

The results of an analysis of the resonator’s parameters for the proposed ion source are presented here (that includes electrical and magnetic fields strength and distribution analysis with resonant frequency and quality factor calculations), along with the simulation results of the capacitive power coupling with source resonator.

В 2017 году в ЛЯР ОИЯИ был разработан и изготовлен компактный ЭЦР ионный источник, основанный на коаксиальном резонаторе и кольце из постоянных магнитов [1]. Данный источник способен генерировать пучки однозарядных ионов с плотностью тока 8.3 mA/cm^2 (He^+). В НИЦ КИ – “ИТЭФ” начаты работы над созданием аналогичного ЭЦР ионного источника (Рис. 1) для установки по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов [2]. Основное отличие данного источника — подвижная задняя стенка резонатора, что позволяет производить перестройку частоты для точной настройки согласования. Данная конструктивная особенность также позволит

оценить влияние собственной частоты резонатора источника на величину извлекаемого тока ионов.

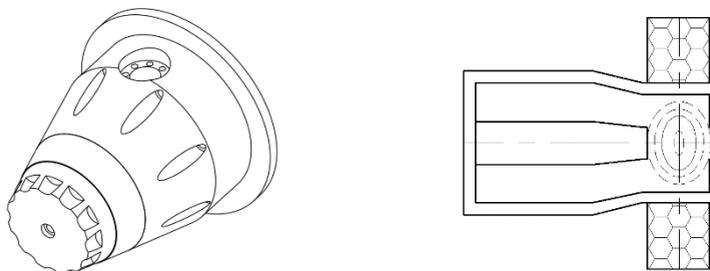


Рис. 1. Компактный ЭЦР ионного источник

Проведено моделирование электродинамических характеристик (ЭДХ) резонатора на частоте 2.45 ГГц с целью определения его геометрических размеров. Длина резонатора источника составила 36 мм, диаметр внешнего проводника – 25 мм. Добротность ненагруженного плазмой резонатора $Q = 4300$.

Была изготовлена магнитная система удержания плазмы источника, состоящая из восьми прямоугольных неодимовых магнитов, установленных в корпус из ABS пластика. Согласно результатам измерений, система способна генерировать замкнутую ЭЦР поверхность 875 Гс, соответствующую частоте ЭЦР 2.45 ГГц.

Для ввода мощности в источник была выбрана подвижная антенна емкостной связи, с помощью которой можно подстраивать условия согласования с резонатором, нагруженным плазмой. С помощью моделирования было определено, что разработанное устройство связи не снижает электрической прочности резонатора.

Список литературы

1. Bogomolov, S.L., Bondarchenko, A.E., Efremov, A.A., Kostyukhov, Y.E., Kuzmenkov, K.I., Loginov, V.N., Pugachev, D.K. & Fatkullin, R.D. 2019, "Development of compact 2.45 GHz ECR ion source for generation of singly charged ions", Journal of Instrumentation, vol. 14, no. 1.

2. A. Sitnikov et al., "Effect of Tin Ion Implantation on the Properties of Amorphous Ge₂Sb₂Te₅ Thin Films," Proceedings of the 26th Russian Particle Accelerator Conf., vol. RUPAC2018, p. Russia, 2018, doi: 10.18429/JACOW-RUPAC2018-TUPSA41.

В.А. ФЛЕГЕНТОВ, К.В. САФРОНОВ, С.А. ГОРОХОВ, А.С. ТИЩЕНКО,
Д.О. ЗАМУРАЕВ, А.Л. ШАМРАЕВ, С.Ф. КОВАЛЕВА, Д.С.
ГАВРИЛОВ, Я.В. ЛОСЕВ, А.В. ИВАНУШКИН, К.Ю. КУСТАРЕВ, В.В.
МЕНЬШЕНИН, А.В. ПОТАПОВ

*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Снежинск, Россия,
dep5@vniitf.ru*

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На 100 ТВт фемтосекундной лазерной установке проведены эксперименты по ускорению электронов в плотных газовых струях. Генерируемые пучки электронов конвертировались в жесткое рентгеновское излучение посредством Та конвертера установленного за газовым соплом. Были измерены выход жесткого рентгеновского излучения и размер источника.

V.A. FLEGENTOV, K.V. SAFRONOV, S.A. GOROKHOV,
A.S. TISCHENKO, D.O. ZAMURAEV, A.L. SHAMRAEV,
S.F. KOVALEVA, D.S. GAVRILOV, Y.V. LOSEV, A.V. IVANUSHKIN,
K.Y. KUSTAREV, V.V. MEN'SHENIN, A.V. POTAPOV

*Russian Federal Nuclear Center – All Russian Scientific Institute of Technical Physics named
after academician Eu. I. Zababakhin, Snezhinsk, Russia*

PULSE-PERIODIC LASER-DRIVEN HARD X-RAY SOURCE

We report on experiments on electron acceleration from high density gas jets which were performed on 100 TW femtosecond laser facility. Generated electron beams were converted into hard x-ray bremsstrahlung radiation via Ta slab placed after gas target. Yield of hard x-rays and source size were measured.

С ростом мощности лазерных установок с ультракороткими импульсами получили развитие лазер-плазменные ускорители заряженных частиц. Ускоряемые на лазерных установках пучки релятивистских электронов могут служить яркими источниками жесткого рентгеновского излучения с беспрецедентно малыми размерами излучающей области и короткими длительностями импульса. Свойства таких источников привлекательны для ряда прикладных задач, например, в неразрушающем контроле, в диагностировании быстропротекающих процессов и др.

В последнее время в лазер-плазменном ускорении электронов достигнуты значительные успехи. Получены пучки электронов высокого качества с энергией частиц до нескольких ГэВ [1,2]. Однако, заряд таких пучков, по-прежнему, не превышает нескольких пКл. Для большинства практических

применений необходимо увеличивать заряд пучка. Несмотря на то, что ранее уже делались попытки увеличения количества ускоренных электронов в генерируемых пучках [3,4], до сих пор эти режимы генерации мало изучены.

На 100 ТВт фемтосекундной лазерной установке (800 нм, 25 фс, 10 Гц) проведена серия экспериментов по генерации пучков релятивистских электронов в плотных газовых струях ($n_e \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Параметры газовых струй испускаемых соплом мишенного узла измерены методом интерферометрии.

Зарегистрированы пучки с экспоненциальным спектром с максимальной энергией до 60 МэВ и суммарным зарядом до нескольких сотен пКл.

В экспериментах генерируемые пучки электронов конвертировались в жесткое рентгеновское излучение посредством Та конвертера толщиной 3 мм установленного за газовым соплом. Измеренная доза жесткого рентгеновского излучения на оси пучка на расстоянии 2 м от источника составила ~ 3 мР/импульс, при размере излучающей области $\sim 0,6$ мм.

Список литературы

1. X. Wang, R. Zgadjai, N. Fazel *et al.*, Nature Communications V.4, No.1988 (2013)
2. W. P. Leemans, A. J. Gonsalves, H.-S. Mao *et al.*, Phys. Rev. Lett. 113, 245002 (2014)
3. V. Malka, J. Faure, J.R. Marques *et al.*, Phys. Plasmas, Vol. 8, No. 6, 2605-2608 (2001)
4. M.I.K. Santala, Z. Najmudin, E.L. Clark *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 1227 (2001)

И.А. АШАНИН, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СИБИРЬ-2»

Для инжекции в бустерный синхротрон, разрабатываемый для реконструкции ускорительного комплекса «Сибирь-2» Курчатовского комплекса синхротронных и нейтронных исследований, проектируется новый линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) на энергию около 200 МэВ. Разработана общая компоновочная схема ЛУЭ и её отдельных элементов. Выполнено предварительное моделирование динамика пучка в электронной пушке, группирователях и ускоряющих секциях.

S.M. POLOZOV, V.I. RASHCHIKOV

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

ELECTRON LINEAR ACCELERATOR FOR THE ACCELERATING COMPLEX «SIBERIA-2»

New linear accelerator (linac) with energy about 200 MeV for injection to booster synchrotron of reconstructing accelerating complex «SIBERIA-2» is under development now. The base scheme and main linac parts are worked out. Preliminary computer simulation of electron gun, bunchers and accelerating sections are fulfilled.

Для инжекции в бустерный синхротрон, разрабатываемый для реконструкции ускорительного комплекса «Сибирь-2» Курчатовского комплекса синхротронных и нейтронных исследований, предполагается построить новый линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) на энергию около 200 (или 300) МэВ. Ток ускоренного пучка на выходе ускорителя должен составлять 300-400 мА. Для эффективной инжекции в бустер необходимо минимизировать энергетический спектр пучка, а также получить на выходе ЛУЭ приемлемую величину поперечного эмиттанса, не превышающую нескольких мм·мрад.

ЛУЭ будет включать в себя четыре или шесть (для энергии 300 МэВ) секций, длиной примерно 2,4 м каждая, работающих на стоячей волне (бипериодическая ускоряющая структура, БУС). Перед первой регулярной секцией будут размещены адиабатический группирователь, в составе которого будет несколько (4-7) нерегулярных ускоряющих ячеек с нарастающими фазовой скоростью волны и амплитудой ускоряющего поля для продольной группировки пучка. Энергия пучка на выходе этой секции будет составлять около 10 МэВ. Для повышения коэффициента захвата частиц в режим ускорения и уменьшения энергетического спектра пучка дополнительно перед адиабатическим группирователем может быть размещен одно- или двухззорный

группирователь, работающий на частоте, уменьшенной в два или в четыре раза по сравнению с рабочей частотой секций.

В качестве источника электронов предлагается использовать классическую трехэлектродную пушку с оксидным подогреваемым катодом (с питанием от отдельного модулятора). Первые результаты моделирования динамики пучка, проведенной с помощью разработанного на кафедре Электрофизических установок НИЯУ МИФИ пакета BEAMDULAC [1] показывают, что оптимальной энергией инжекции будет 100-120 кэВ. В этом случае коэффициент захвата в режим ускорения можно довести до 70-75 %. Моделирование пушки было выполнено с помощью пакета СУМА [2]. Выбрана оптимальная конфигурация электродов и рассчитана динамика пучка в электронной пушке (рис.1). Ток пучка при таких параметрах составил 1.03 А, энергия на выходе пушки 100 кэВ с разбросом 0.76%. Радиус пучка 3.6 мм, фазовый размер 6.5 μ (см-мрад), микропервеанс 0.03.

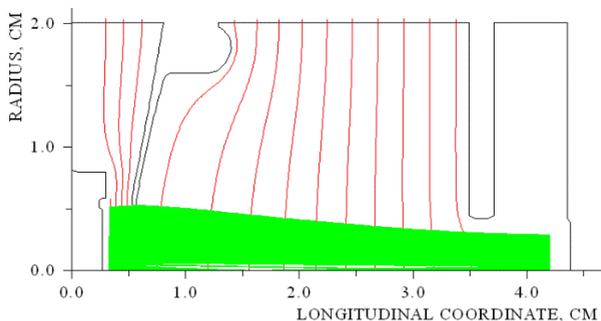


Рис. 1. Эквипотенциали электрического поля (красные линии) и траектории частиц (зеленые) для итоговой геометрии

Список литературы

1. Bondarenko T.V., Masunov E.S., Polozov S.M. et al. // BEAMDULAC-BL code for 3D simulation of electron beam dynamics taking into account beam loading and coulomb field. Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations, 6 (88), 2013, P. 114-118.

2. Рашиков В.И. // В кн.: Вопросы атомной науки и техники Серия: Ядерно- физические исследование, вып. 10(18), М., 1990, С. 50.

В.С. ДЮБКОВ, В.Ю. МЕХАНИКОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ БЕЗДИСПЕРСНЫЙ ПОВОРОТНЫЙ КАНАЛ ИОНОВ УРАНА ДЛЯ ПРОЕКТА DERICA

Одним из актуальных направлений ядерной физики низких энергий является изучение радиоактивных изотопов. К настоящему времени не найдена граница ядерной стабильности на большей части карты нуклидов. Для поиска границы и решения других фундаментальных проблем, таких как измерение зарядовых форм-факторов радиоактивных изотопов, изучение структуры и радиоактивных распадов экзотических ядер и резонансов, получение тяжелых ядер, изучение барьеров деления и атомно-физические исследования с почти полностью ободранными ионами, на базе ЛЯР им. Г.Н. Флерова ОИЯИ разрабатывается проект перспективного ускорительно-накопительного комплекса международного мегапроекта DERICA [1]. В работе предложен бездисперсионный поворотный магнитооптический канал для ионов $^{238}\text{U}^{60+}$ с энергией 50 МэВ/нуклон, располагаемый между двумя сверхпроводящими секциями LINAC-100. Представлены результаты расчёта параметров магнитных элементов такого канала и динамики сгруппированного банча ионов $^{238}\text{U}^{60+}$.

V.S. DYUBKOV, V.YU. MEKHANIKOVA

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

NON-DISPERSIVE MAGNETIC LATTICE OF URANIUM ION TRANSPORT CHANNEL FOR DERICA PROJECT

One of the state-of-art field of low-energy nuclear physics is the study of radioactive isotopes. Up to date, the nuclear stability boundary has not been found for the biggest part of the nuclide map. To find this boundary and solve other fundamental problems, DERICA project is under consideration at Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (JINR) [1]. Magnetic lattice design of dispersion-free channel for $^{238}\text{U}^{60+}$ ions with an energy of 50 MeV/u, placed between two LINAC-100 superconducting sections is proposed. Found parameters of the transport channel magnetic elements as well as ion dynamics simulation results are presented.

Международный мегапроект DERICA, реализуемый в ОИЯИ, предполагает сооружение сверхпроводящего линейного ускорителя драйвера для ускорения большого набора ионов до энергии 100 МэВ/нуклон. В соответствии с текущим проектом комплекса DERICA (см. рис. 1), сверхпроводящий линейный ускоритель LINAC-100 на энергию ионов 100 МэВ/нуклон, работающий на частоте 325 МГц, состоит из двух частей: на энергию от (6...20) МэВ/нуклон до 50 МэВ/нуклон и от 50 МэВ/нуклон до 100 МэВ/нуклон.

Из рис. 1 видно, что для перевода ускоряемых ионов из первой секции во вторую, необходим поворотный канал (I). Одним из требований, предъявляемых

к этому каналу транспортировки, является отсутствие дисперсии, что продиктовано необходимостью эффективной инжекции во вторую секцию. Предложенный вариант канала состоит из 7 поворотных магнитов, четыре из которых поворачивают ионы $^{238}\text{U}^{60+}$ с энергией 50 МэВ/нуклон на $22,5^\circ$ и три на угол 30° , и совокупности квадруполей. Для обеспечения нулевого значения дисперсионной функции магнитооптического канала на выходе из него выполнен расчёт необходимых значений градиентов квадрупольных линз. Для согласования эмиттансов пучка $^{238}\text{U}^{60+}$ предложено дополнительно использовать два триплета квадрупольных линз. На рис. 2 представлен результаты расчёта динамики ионов $^{238}\text{U}^{60+}$ в канале, полученные для начального эмиттанса пучка для обеих поперечных фазовых плоскостей $0,13\pi$ мм·мрад и диаметре пучка 3 мм.

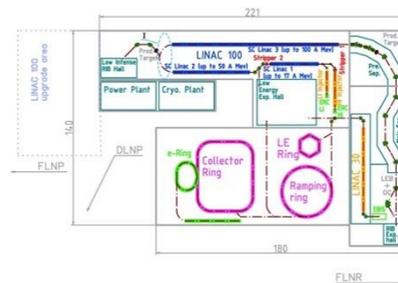


Рис. 1. План расположения систем комплекса DERICA

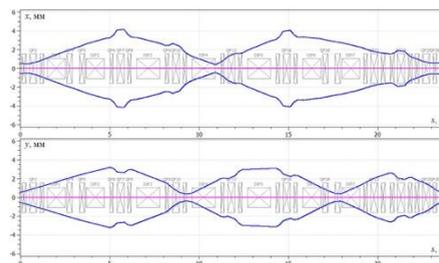


Рис. 2. Огибающие пучка ионов $^{238}\text{U}^{60+}$ в поворотном канале

Список литературы

1. Grigorenko L.V., Sharkov B.Yu., Fomichev A.S. and others // Phys. Usp. 2019. Vol. 62, P. 675–690.

К.Е. ПРЯНИШНИКОВ^{1,3}, П.А. ФЕДИН^{1,2}, Р.П. КУЙБИДА^{1,2},
Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА^{1,2}, Т.В. КУЛЕВОЙ^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ВОЛЬФРАМА И ЖЕЛЕЗА НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР

Вольфрам и железо являются конструкционными материалами ядерных и термоядерных реакторов и должны выдерживать радиационную нагрузку. На тяжелоионном ускорителе ТИПр расположенном в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ выполняются имитационные эксперименты по облучению образцов вольфрама и железа для проведения экспресс-анализа изменения структуры и свойств материалов под воздействием пучков тяжелых ионов.

После обновления канала транспортировки пучка ионов из ускоряющей структуры в мишенную камеру необходимо было выполнить поиск и экспериментальную проверку режимов работы квадрупольных линз для проведения сеансов облучения образцов конструкционных материалов.

К.Е. PRIANISHNIKOV^{1,3}, P.A. FEDIN^{1,2}, R.P. KUIBEDA^{1,2},
E.R. KHABIBULLINA^{1,2}, T.V. KULEVOY^{1,2}

¹NRC “Kurchatov institute” – ITEP, Moscow, Russia

²NRC “Kurchatov institute”, Moscow, Russia

³National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia

PREPARATION AND CONDUCTING OF IRRADIATION EXPERIMENTS FOR EXPRESS-ANALYSIS OF TUNGSTEN AND IRON ON THE HIPR

Tungsten and iron are structural materials of nuclear and thermonuclear reactors and must withstand radiation burden. Simulation experiments on irradiating tungsten and iron samples are carried out at the HIPr heavy-ion accelerator located at the NRC «Kurchatov Institute» – ITEP to conduct an express analysis of changes in the structure and properties of materials under the influence of heavy ion beams.

After updating the channel for transporting the ion beam from the accelerating structure to the target chamber, it was necessary to search and experimentally verify the operation modes of quadrupole lenses for conducting irradiation sessions of samples of structural materials.

Разработка современных ядерных и термоядерных реакторов требует использования устойчивых к радиационному воздействию конструкционных материалов. Имитационные эксперименты по радиационному повреждению

образцов материалов, проводимые с помощью ускорителей по сравнению с подобными экспериментами в реакторах отличаются быстротой выполнения и отсутствием наведенной радиоактивности. На тяжелоионном ускорителе ТИПр выполняются эксперименты [1,2] по облучению образцов вольфрама и железа для проведения экспресс-анализа изменения структуры и свойств материалов под воздействием пучков ионов железа.

Согласование в канале транспортировки пучка ионов из ускоряющей структуры с ПОКФ с мишенной камерой выполняется тремя квадрупольными линзами. Перед мишенной камерой был увеличен диаметр участка канала транспортировки пучка ионов для расширения возможного профиля и повышения интенсивности пучка, приходящего на мишень.

После выполнения моделирования канала транспортировки пучка на основе найденных режимов работы квадрупольных линз проводилась их экспериментальная проверка путем снятия профиля пучка в мишенной камере с помощью профилометра. Профиль пучка снимался, передвигая пучок сначала по горизонтальной, затем по вертикальной плоскости используя корректирующие дипольные обмотки в двух квадрупольных линзах. Пересчет токов в корректирующих обмотках квадрупольных линз в расстояние, на которое перемещался пучок на мишени осуществлялся согласно [3].

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ № 1570 от 16.07.2019).

Список литературы

1. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А. и другие// Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 9, № 3. С. 245-258.
2. Федин П.А., Прянишников К.Е., Куйбида Р.П. и другие// Сборник трудов V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» Лаплаз-2019: Сборник научных трудов. 2019. С. 181-182.
3. Федин П.А., Куйбида Р.П., Саратовских М.С. и другие// Известия высших учебных заведений, Физика. 2016. Т. 59. № 9-3. С. 293-296

КАРИМОВ А.Р.^{1,2}, БУЛЫГИН А.М.¹, ШИКАНОВ А.Е.¹,
КОЗЛОВСКИЙ К.И.¹, ДЕРЯБОЧКИН О.В.¹, ТЕРЕХОВ С.А.¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННГО УСКОРИТЕЛЯ

Анализируется техническая реализация конфигурации магнитных полей, необходимых для ускорения плазменных потоков. Приведенные оценки позволяют сделать предварительный выбор параметров ускорителя, обеспечивающих ускорение плазменных потоков в широком диапазоне плотностей и энергий. В рассматриваемом дизайне магнитной системы обсуждается вопрос об использовании данной ускорительной схемы для инициализации ядерных реакций во встречных потоках частиц.

KARIMOV A.R.^{1,2}, BULYGIN A.M.¹, SHIKANOV A.E.¹,
KOZLOVSKY K.I.¹, DERYABOCHKIN O.V.¹, TEREKHOV S.A.¹

¹Department of Electrophysical Facilities, National Research
Nuclear University MEPhI, Kashirskoye shosse 31, Moscow, Russia

²Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Izhorskaya 13/19, Moscow,
Russia

MAGNETIC SYSTEM OF THE PULSED PLASMA THRUSER

The technical realization of the configuration of magnetic fields, which is required for plasma flow acceleration, is analyzed. These estimates allow us to preliminary suggest the accelerator parameters. They provide acceleration of plasma flows over a wide range of densities and energies. Consuming this acceleration scheme with such magnetic system design as a scheme for initializing nuclear reactions with colliding beams has been discussed.

Обсуждается техническая реализация конфигурации магнитных полей в ускорительном устройстве, в котором внешнее магнитное поле управляет колебаниями потока плазмы, но сама величина частоты колебаний определяется собственными плазменными процессами используемой среды (отметим, что возможно использование квазинейтральной, заряженной или пылевой плазмы) [1-3]. При определенном соотношении между начальными кинематическими параметрами пучка взаимодействие с внешним полем приводит к усилению собственных электростатических колебаний плотности и скорости плазмы/пучка, как по частоте, так и по амплитуде колебаний.

Используемое для этих целей внешнее магнитное поле состоит из радиальной и нестационарной аксиальной составляющей:

$$B_0 = B_{0r}e_r + B_{0z}(t)e_z$$

где B_{0r} и $B_{0z}(t)$ — известные, независимые функции.

В настоящей работе описывается математическая модель установки, способной создавать постоянное радиальное магнитное поле. Основу конструкции составляет система близко расположенных спиральных генераторов, ранее используемая, в качестве источника импульсов высокого напряжения [4]. Обсуждаются условия и приближения, при которых возможно возникновение данного поля в системе. В работе приведены оценки геометрических параметров магнитной системы, а также максимально возможное значение магнитной индукции поля.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 19-32-90105).

Список литературы

1. Каримов А.Р. и Булыгин А.М. // Вестник ОИВТ РАН 2019, т. 2, с. 27-32
2. Karimov A.R., Terekhov S.A., Shikanov A.E. and Murad P.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019, Vol. 47, P. 1520-1525
3. Karimov A.R., Murad P.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. Vol. 46, P. 882–887
4. Пальчиков Е.И., Рябчук А.М., Красников И.Ю. // ЖТФ 2012, т. 2, вып.2, с. 136-146

В.А. ВОРОНЦОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МНОГФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЦИКЛОТРОН ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Среди методов лечения онкологических заболеваний протонная терапия занимает уникальное место. Основы протонной терапии заложил, Уильям Брэгг-старший. Суть в том, что протон при попадании в мишень сначала почти не теряет энергию, а затем, перед самой остановкой, теряет ее очень интенсивно. Кривая получила название кривой Брэгга, а пик стал называться брэгговским пиком. Эксперименты с облучением опухолей протонным пучком начались в Беркли. Для их получения использовались медицинские циклотроны. В настоящее время в мире существует немало центров протонной терапии.

V.A. VORONTSOV

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

MULTYPURPOSE CYCLOTRON FOR MEDICAL AND PHARMACEUTICAL PURPOSES

Among methods of treatment of oncological diseases proton therapy takes the unique place. Laid the foundation of proton therapy, William Bragg Sr. The point is that the proton at hit in a target at first almost does not lose energy, and then, before the stop, loses it very intensively. The curve received the name of a curve of Bragg, and the peak began to be called Bragg peak. Experiments with radiation of tumors a proton bunch began in Berkeley. For their receiving medical cyclotrons were used. Now in the world there are many centers of proton therapy.

Строительство протонных центров обходится в сотни миллионов долларов. Потребность их очень высока. Главный «инструмент» протонной терапии — ускоритель элементарных частиц, чаще всего циклотрон [1]. Типичные медицинские ускорители разгоняют протоны до энергий от 75 до 200 МэВ. Для терапии важна возможность получения протонов с разными энергиями: они имеют брэгговские пики на разной глубине проникновения, формируя таким образом плато дозного распределения или модифицированный пик Брэгга (spread out Bregg peak, SOBП). Подбирая нужное распределение протонов по энергии, можно равномерно «заполнить» опухоль максимумами ионизации. Выведенный пучок протонов из ускорителя передается в так называемую лечебную комнату (treatment room, в центрах протонной терапии их обычно от трех до пяти), где находится пациент. Циклотроны применяются и в фармацевтических целях для наработки изотопов для ОФЭКТ и ПЭТ. Фармацевтический циклотрон может разгонять положительно и отрицательно заряженные ионы до энергии до 70 МэВ. В работе рассматривается возможность

использования одного циклотрона, как для медицинских, так и для фармацевтических целей.

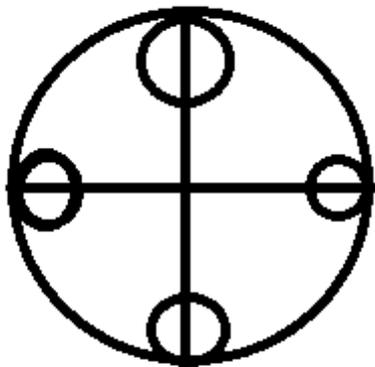


Рис1. Многофункциональный циклотрон

При этом количество гентри может быть уменьшено, а продвижение очереди на лечение пациентов может быть ускорено. Кроме того возможна модификация существующих циклотронов для использования их в медицинских и фармацевтических целях.

Список литературы

1. <http://iba-radiopharmasolutions.ru/products/ciklotrony>

В.А. ВОРОНЦОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

О ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

В качестве ускоряемых объектов в работе рассматривается возможность использования отдельных доменов ферромагнетика. Также возможно и наличие твердотельной связи доменов. Ускорение осуществляется за счёт градиента основного магнитного поля. Магнитное поле самих ферромагнетиков создаёт продольную потенциальную яму в основном магнитном поле.

V.A. VORONTSOV

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

ABOUT A POSSIBILITY OF ACCELERATION OF THE ELECTRON RING WITH FERROMAGNETIC OBJECTS BY THE ELECTROMAGNETIC FIELDS

As the accelerated objects in work the possibility of use of separate domains of a ferromagnetic is considered. Also perhaps an existence of solid-state communication of domains is possible. Acceleration is carried out at the expense of a gradient of the base magnetic field. The magnetic field of ferromagnetics creates a longitudinal potential well in the base magnetic field.

Градиент основного магнитного поля не превышает градиента потенциальной ямы, создаваемой ферромагнетиком и не позволяет ускоряемым объектам выходить за её пределы. Глубина потенциальной ямы может быть увеличена за счёт электронного пучка, находящегося в этой потенциальной яме. Он тоже не покидает области ямы, отражаясь от её стенок. Возникает некоторое подобие движущегося адгезатора, использовавшегося ранее при когерентном ускорении протонов электронными кольцами. Такие работы проводилась в своё время в Дубне под руководством В.П. Саранцева [1]. В адгезаторе (адиабатический генератор заряженных торов) в магнитной пробке формировалось сильноточное кольцо электронов. Назначение кольца заключалось в создании сильного ускоряющего поля, превосходящего СВЧ ускоряющие поля. Далее кольцо нагружалось протонами, получаемыми при ионизации атомов водорода. После этого нагруженное кольцо выталкивалось из пробки в ускоряющую структуру. Подобные эксперименты стали проводиться по всему миру. Однако при выталкивании из магнитной пробки кольцо разваливалось, и ускорения протонов не получалось. В данной работе рассматривается возможность ускорения ненагруженным электронным кольцом

самого адгезатора, представляющего собой ферромагнитный объект, формы которого могут быть различны. Таким образом, это некое подобие повторения идеи ускорения протонов электронными кольцами за счёт ускорения электронных колец внешними полями. При этом ускоряющими полями могут быть как магнитные поля с соответствующим градиентом продольного поля, так и электрические поля. Получается своего рода комбинация когерентного ускорения нейтральных доменов ферромагнетика магнитным и электрическим полем. Оценки показывают, что при числе атомов порядка 10^{14} возможно их ускорение до 1 МэВ на расстоянии примерно в 1 метр. Размеры доменов составляют примерно 10^{-5} метра. Продольные магнитные поля находятся в диапазоне 1 Тесла. Темп ускорения невысок ввиду использования вместо протонов атомов железа. Имеется достаточно много параметров, позволяющих регулировать выбор и поведение рассматриваемых ускоряемых объектов.

Список литературы

1. Particles and Nuclei, Letters. 2004. No. 3[120]

А.А. ЗАВАДЦЕВ, Д.А.ЗАВАДЦЕВ, О.А.ПЕРЕВОЗЧИКОВА,
Д.В.ЧУРАНОВ

ООО «Нано Инвест», Москва, Россия

БИПЕРИОДИЧЕСКИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ RING

Рассмотрены ускоряющие структуры RING-90, RING-180 и RING-270, относящиеся к типу кольцевых бипериодических ускоряющих структур. Структура RING представляет собой кольцевую цепочку связанных резонаторов с рабочим видом колебаний $\pi/2$. Структуры RING-90 и RING-180 могут быть эффективно использованы для ускорителей с большой фазовой скоростью, а структура RING-270 – в ускорителях ионов с малой фазовой скоростью.

A.A. ZAVADTSEV, D.A. ZAVADTSEV, O.A. PEREVOZCHIKOVA,
D.V. CHURANOV

Nano Invest, LLC, Moscow, Russia

BIPERIODIC ACCELERATING STRUCTURES RING

The accelerating structures RING-90, RING-180 and RING-270, which are related to the type of ring biperiodic accelerating structures, are considered. The RING structure is a ring chain of coupled cavities with an operating mode $\pi/2$. RING-90 and RING-180 structures can be used effectively for accelerators with high phase velocity, and RING-270 structure can be used in ion accelerators with low phase velocity.

Период в ускоряющих структурах RING-90, RING-180 и RING-270 равен $\pi\lambda/4$, $\pi\lambda/2$ и $3\pi\lambda/4$ и сдвиг фазы между соседними ускоряющими резонаторами 90, 180 и 270° соответственно, и рабочий вид колебаний $\pi/2$.

Структура RING-180 включает ряд ускоряющих резонаторов, возможно, Ω -образной формы, и резонаторы связи, поочередно связанные в виде кольцевой цепочки. Ячейки связи на краях структуры – цилиндрические с видом колебаний E_{010} . Остальные – призматические с видом колебаний H_{101} . Теоретически в структуре существует вырожденный вид колебаний $\pi/2$ с большим полем в резонаторах связи и с нулевым полем в ускоряющих резонаторах. Конструкция структуры такова, что ячейки связи расположены вне оси структуры и не связаны с пучком, а входной каплер связан с ускоряющим резонатором, в котором на вырожденном виде $\pi/2$ поле равно нулю. Кроме того, внесение небольшой отстройки ячеек связи приведет к смещению собственной частоты вырожденного вида $\pi/2$ от рабочей частоты. Все это исключает возбуждение вырожденного вида $\pi/2$ как ВЧ генератором, так и пучком.

В структурах RING-90 и RING-270 (рис.1) ускоряющие резонаторы расположены на оси и связаны друг с другом, образуя линейную цепочку. Крайние ускоряющие резонаторы дополнительно связаны друг с другом через

внешний призматический резонатор так, что структура образует кольцевую цепочку. Два вырожденных вида колебаний $\pi/2$ в структуре возбуждаются ВЧ генератором через волноводный мост и два каплера, расположенные в четной и нечетной ускоряющих ячейках, со сдвигом по фазе в 90° . Оба этих вырожденных вида колебаний являются рабочими и участвуют в процессе ускорения.

Малый и большой периоды структур RING-90 и RING -270 определяют их эффективное использование в ускорителях с большой и малой фазовой скоростью соответственно.

Коэффициент пролетного времени во всех структурах $T \approx 0.9$ при длине ускоряющего зазора $d \approx \pi\lambda/4$. Это приводит к целесообразности использования пролетных трубок в структурах RING-180 и RING-270. Отсутствие пролетных трубок в структуре RING-90 определяет малый коэффициент перенапряжения.

Кольцевая цепочка связанных резонаторов имеет вдвое меньшее число видов колебаний в сравнении с традиционной линейной цепочкой в бипериодической ускоряющей структуре и, соответственно, вдвое большее частотное разделение рабочего вида колебаний $\pi/2$ с соседними видами.

Структура RING-180 имеет высокое шунтовое сопротивление, как и традиционная бипериодическая структура с внешними резонаторами связи. Структура RING-90 может быть использована для реализации большого темпа ускорения. Структура RING-270 может быть эффективно использована в ускорителях ионов с малой фазовой скоростью.

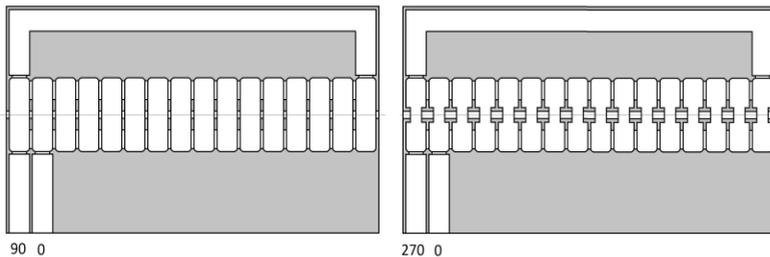


Рис.1. Ускоряющие структуры RING-90 и RING-270

Список литературы

1. Zavadtsev A.A. Bipериодic U-structures for Particle Accelerators. - Fourth European Accelerator Conference. Vol.3, London, 1994, pp.2176-2178.

А.А. ЗАВАДЦЕВ, Д.А. ЗАВАДЦЕВ, О.А. ПЕРЕВОЗЧИКОВА,
Д.В. ЧУРАНОВ

ООО «Нано Инвест», Москва, Россия

КОЛЬЦЕВАЯ БИПЕРИОДИЧЕСКАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА RING-180

Рассмотрено предложение построения ускоряющей системы линака на базе кольцевой бипериодической ускоряющей структуры RING-180. Проведено сравнение рассчитанных электродинамических характеристик RING-180 с характеристиками структуры с шайбами и диафрагмами и традиционной линейной бипериодической структуры. Показаны преимущества RING-180.

A.A. ZAVADTSEV, D.A. ZAVADTSEV, O.A. PEREVOZCHIKOVA,
D.V. CHURANOV

Nano Invest, LLC, Moscow, Russia

RING BI-PERIODIC ACCELERATING STRUCTURE RING- 180

A proposal to build a LINAC accelerating system based on the ring bi-periodic accelerating structure RING-180 is considered. The calculated electrodynamic characteristics of the RING-180 are compared with the characteristics of the disk and washer structure and the traditional linear bi-periodic structure. The advantages of RING-180 are shown.

Кольцевая бипериодическая ускоряющая структура (КБУС) RING-180 [1] включает последовательную цепочку равного количества поочередно связанных ускоряющих ячеек и ячеек связи. Связанные ячейки образуют кольцевую цепочку, а не линейную, как в традиционной бипериодической ускоряющей структуре (БУС). Граничные условия в кольцевой цепочке приводят к тому, что почти половина видов колебаний, имеющих место в линейной БУС, не могут возбуждаться, и частотное разделение рабочего вида колебаний и соседних видов Δf в КБУС вдвое больше, чем в БУС при равном количестве ускоряющих ячеек и равном коэффициенте связи k . Расчетная модель RING-180 для использования в ММФ для замены Резонатора №1 и его конструкция показаны на рис.1.

Вместе с показанными преимуществами КБУС имеет и недостаток – вырожденные виды колебаний, т.е., например, имеется два вида колебаний $\pi/2$: с полями в ускоряющих ячейках и в ячейках связи. Однако, имеются простые способы борьбы с этим явлением. Во-первых, входной каплер соединен с ячейкой с нулевым полем на нерабочем вырожденном виде $\pi/2$. Во-вторых, почти все ячейки связи расположены вне оси пучка. Дополнительно можно

обеспечить небольшую частотную отстройку ячеек связи. При этом нерабочий вырожденный вид $\pi/2$ не возбуждается ни генератором, ни пучком.

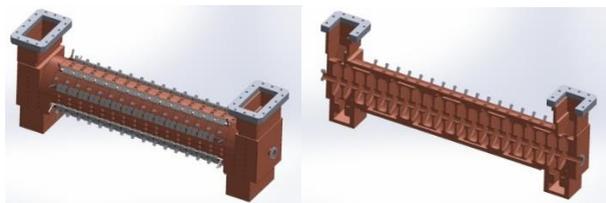


Рис. 1. Конструкция RING-180

Таблица 1. Сравнительные параметры структур структуры с шайбами и диафрагмами (СШД), КБУС и БУС

Параметр	Ед.	СШД	КБУС	БУС
f	МГц	991	991	991
β		0.43-0.44	0.43-0.44	0.43-0.44
k	%	30	15.6	15.6
Δf	МГц	$\pm 11,9$	$\pm 11,9$	± 6
ZT^2	МОм/м	24.0	26.3	22.0
Q_0		18500	15600	10600
D	м	0.4	0.24	0.22

Список литературы

1. Завадцев А.А., Зверев Б.В. Новые ускоряющие системы для ЛУЭ со стоячей волной. - Письма в ЖТФ, т.7, вып.21, 1981, с. 1332-1335.
2. Завадцев А.А., Зверев Б.В. Разработка новых ускоряющих систем для специализированных ЛУЭ со стоячей волной. - Доклады IV Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве, Л., 1981, с. 46.
3. Завадцев А.А., Зверев Б.В. Ускоряющая система. - Авторское свидетельство №852151, 1981.

Н.А. КЛЕОПОВА
ООО «Даймонд Вижен», Москва, Россия.

ПРИМЕНЕНИЕ ДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В докладе приведены результаты применения источника мягкого рентгеновского излучения на основе генератора воздушной электроплазменной дуги между двумя электродами для рентгенографии биологических объектов. В совокупности с высокочувствительным радиографическим регистратором изображений в области мягкого рентгеновского излучения система представляет собой эффективный инструмент для рентгенологических исследований.

N.A. KLEKOVA

Diamond Vision LLC, Moscow, Russia.

APPLICATION OF AN AIR ARC ELECTRO-PLASMA DISCHARGE FOR X-RAY STUDIES OF BIOLOGICAL OBJECTS

Report presents the results of using a source of soft X-ray radiation based on a generator of an air electro-plasma arc between two electrodes for radiography of biological objects. In combination with a highly sensitive X-ray camera, the system is an effective tool for laboratory X-ray studies.

Применение высокочувствительной радиографической камеры, о разработке которой было доложено ранее [1], позволяет реализовать на практике достаточно простой и дешевый переносной рентгеновский аппарат для диагностики повреждений конечностей и внутренних органов в медицинской практике. Такая система, состоящая из воздушного разрядника с микроострийным анодом может создавать на его поверхности микрофокусное пятно с характерным размером менее 1 мм в зависимости от тока дуги, давления и материала анода [2]. Такой источник излучения не требует использования рентгеновских трубок и фильтров, прост и удобен в эксплуатации. Были проведены несколько экспериментов по трансмиссионной рентгено съемке биологических объектов (пальцы руки) согласно схеме, изображенной на рисунке 1. Для предотвращения паразитной засветки чувствительной области регистратора от катодного электрода вследствие его ионной бомбардировки был применен свинцовый коллиматор 8 с диаметром отверстия 5 мм. На рисунке 2 показаны характерные изображения мизинца руки, полученные в таком режиме рентгено съемки. На изображениях хорошо визуализируется костная ткань, хрящи, суставы и мягкие ткани. Предложенная концепция рентгенологической системы может иметь широкое применение после модернизации: использование анодов из различных металлов и запайки газоразрядного промежутка с

последующим напуском газа с требуемым давлением для подстройки спектра излучения.

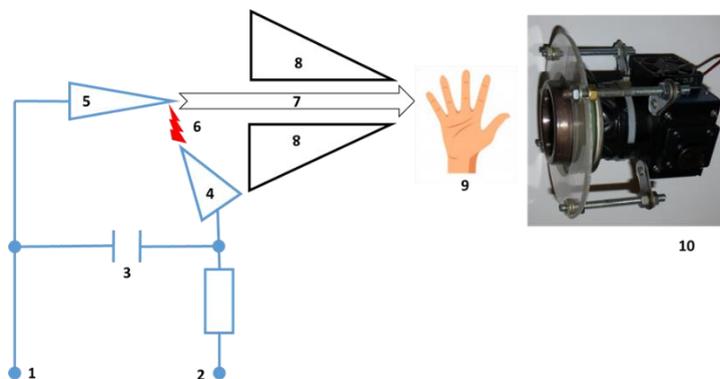


Рисунок 1. Постановка эксперимента. 1,2 – высоковольтные клеммы; 3 – накопительный конденсатор; 4 – медный катод; 5 – стальная игла; 6 – дуговой разряд; 7 – направление рентгеновского излучения; 8 - свинцовый коллиматор. 9 – объект съемки; 10 – регистратор рентгенографических изображений [1].

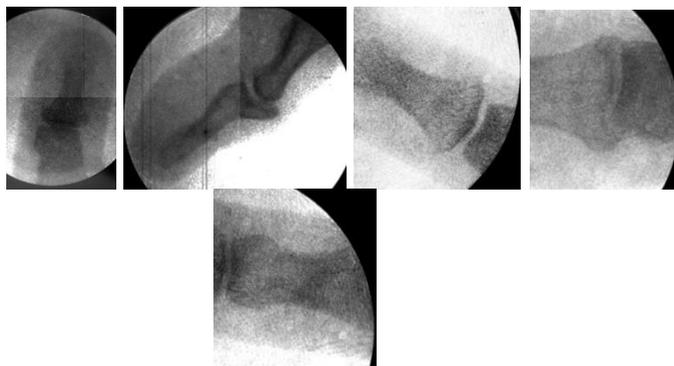


Рисунок 2. Примеры полученных изображений мизинца руки человека.

Список литературы

1. 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» // V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 12 -15 февраля 2019 г., Москва, НИЯУ МИФИ.
2. К.Н. Becker, U. Kogelschatz, К.Н. Schoenbach, R.J. Barker // Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure // CRC Press, 2004, ISBN 9780750309622 - CAT# IP501.

А.А. ЛОСЕВ, Ю.А. САТОВ, И.А. ХРИСАНОВ, А.А. ВАСИЛЬЕВ,
А.Н. БАЛАБАЕВ, А.В. ШУМШУРОВ

НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКЦИОННОЙ СЕТКИ НА ИОННЫЙ ПУЧОК В ЛАЗЕРНОМ ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ

Работа выполнена в рамках разработки лазерного источника для инжекторов многозарядных ионов. Эксперименты посвящены исследованию влияния металлических сеток на характеристики извлекаемых ионов, применяемых в системах экстракции для фиксации границы плазмы. Сравнивались энергетические спектры ионов в плазме, расширяющейся в дрейфовую трубу, при наличии в ней сетки и без таковой. Плазма из различных материалов мишени создавалась при облучении ее импульсами CO₂ лазера при плотности потока около 10¹¹ Вт/см². Измерения проводились с помощью время-пролетного анализатора за экстракционной сеткой типичной конструкции. Обнаружено существенное влияние сетки на энергетическое распределение ионов.

A.A. LOSEV, Yu.A. SATOV, I.A. KHRISANOV, A.A. VASILYEV
A.N. BALABAEV, A.V. SHUMSHUROV

NRC «Kurchatov Institute» - ITEP, Moscow, Russia

INFLUENCE OF EXTRACTION GRID ON ION BEAM CHARACTERISTICS IN A LASER ION SOURCE

This work was performed as part of the development of a laser ion source for injectors of multiply charged ions. Experiment is dedicated to investigating the influence of metal grid on the characteristics of extracted ions. The energy spectra of the ions in plasma expanding into drift tube with and without a grid have been compared. Plasma of different target materials was generated by pulses of a CO₂ laser with focal power density on the target of about 10¹¹ W/cm². The time of flight technique with an electrostatic energy analyzer installed behind the grid was used for measuring the charge states and energy distributions of ions. A significant influence of the grid on the ion energy distribution was observed.

Основная проблема Эксперименты выполнены на лазерном источнике ионов из состава инжектора И-3 (ИТЭФ), который показан на Рис. 1. Он состоит из вакуумной камеры 1, содержащей исследуемую мишень 2. Поверхность мишени облучается импульсно-периодическим лазером [1] с пиковой плотностью мощности 8·10¹¹ Вт/см² (70 МВт/30 нс) с помощью сферического зеркального объектива 3 и плоским зеркалом 4. Мишень цилиндрической формы вращается на определенный угол после каждого акта облучения для достижения наилучшей воспроизводимости характеристик лазерной плазмы. Создаваемая плазма расширяется через отверстие в диафрагме 5 во время-пролетную трубу 6 в конце которой внутри изолятора 7 расположен первый электрод системы экстракции. Электрод плоской формы имеет центральное отверстие, закрытое проволочной сеткой (диаметр провода 80 мкм, период сетки 2 мм).

Энергетические спектры ионов измерялись на дрейфовой длине 1.35 м с помощью экспериментальной техники [2] на основе электростатического цилиндрического дефлектора 8 и ВЭУ (143 EM EMI Electronics Electron Tubes) 9. Сигналы ВЭУ регистрировались для серии последовательных значений настройки анализатора в интервале наблюдения ионов. Статистический разброс данных для каждой настройки анализатора оценивался по десяти выстрелам. Энергетические спектры ионов реконструировались из полученной базы данных с помощью компьютерной программы, разработанной авторами.

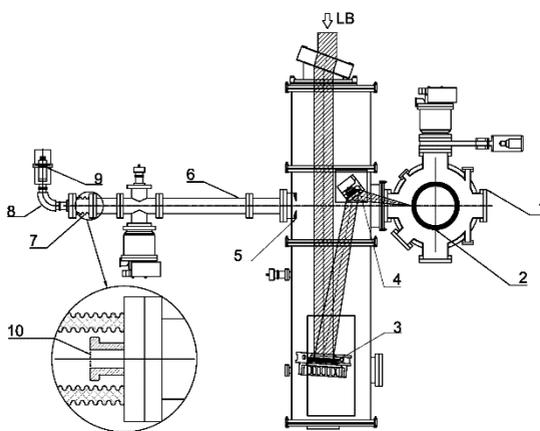


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В результате исследования получены спектры разлета ионов плазмы углеродной и вольфрамовой мишени. Рассчитаны парциальные токи частиц различной кратности ионизации и их интегральное число в отсутствии и при наличии экстракционной сетки в дрейфовом пространстве.

На Рис. 2а приведено сравнение энергетических спектров разлета ионов углерода, полученных после пролета 213 см от мишени до ВЭУ при наличии на оси пролета металлической сетки (внизу) и без таковой (вверху). Аналогичные данные для плазмы вольфрамовой мишени приведены справа на Рис. 2б. Как видно, пучок заряженных частиц из графитовой мишени имеет верхнюю границу по энергии около 5 кэВ, тогда как пучок вольфрамовых ионов имеет энергию более 10 кэВ. Для обоих сортов ионов наблюдается сокращение потока частиц с энергией выше единиц кэВ. Для легких ионов этот эффект мал, в то время как для пучка тяжелых частиц он значительный, так что ионы с энергией более 10 кэВ практически пропадают.

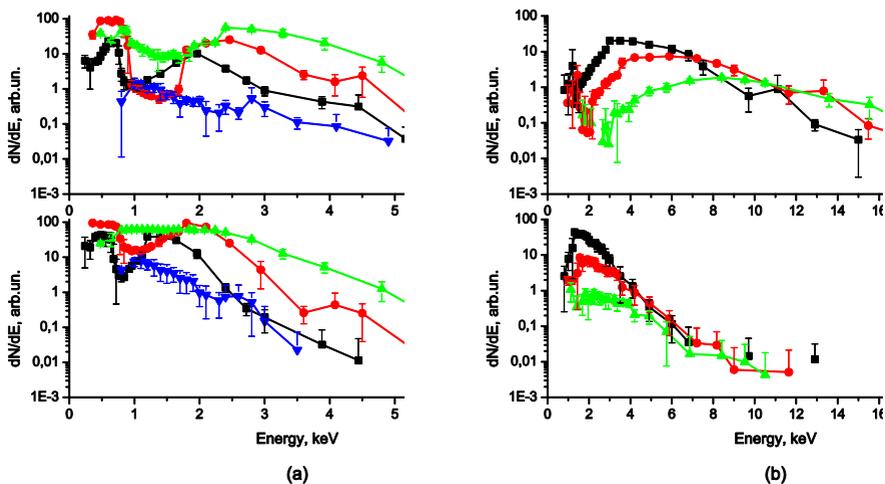


Рис. 2. Энергетические распределения ионов углерода (а) и вольфрама (б), полученные в присутствии сетки (внизу) и в ее отсутствии (вверху)

Те же экспериментальные данные показаны на Рис. 3 а,б в виде парциальных токов ионов наиболее представленных кратностей ионизации. Для ионов углерода (слева) эффект воздействия сетки состоит в появлении «хвоста» медленных частиц без существенной потери амплитуды наиболее представленной компоненты C^{4+} (менее, чем на 20%), в то время как для ионов вольфрама амплитуда W^{7+} уменьшается более чем на 90 %, амплитуда W^{6+} - на 80 %, амплитуда W^{5+} - на 45 %. Кроме того пик полного тока для тяжелых ионов существенно сдвигается по времени пролета (например, для W^{5+} этот сдвиг составляет ~ 20 мкс).

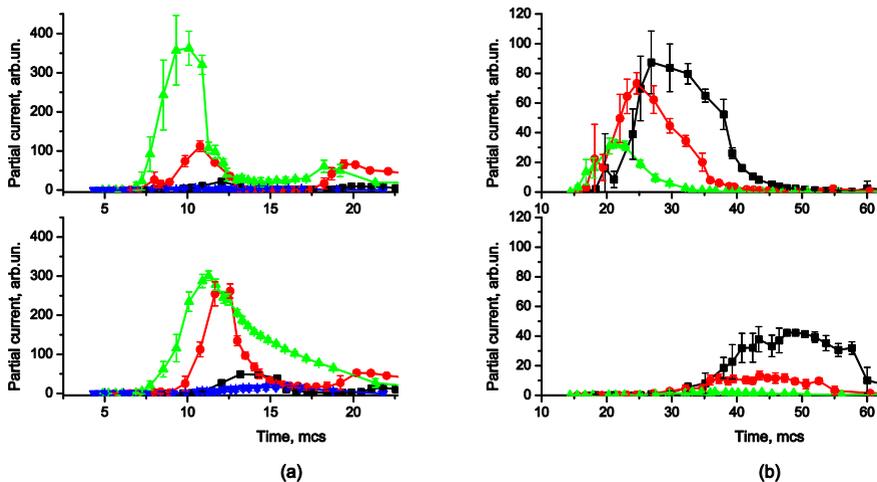


Рис. 3. Восстановленные парциальные токи ионов углерода (а) и вольфрама (б), полученные в присутствии сетки (внизу) и в ее отсутствии (вверху).

Полученные данные представляют важную информацию, которую следует учитывать при разработке лазерных источников ионов, в особенности тяжелых. В частности, приведенные в работе данные накладывают определенные условия при выборе дрейфовой длины системы экстракции, которую следует выбирать достаточно большой для снижения плотности плазмы на экстракционной сетке. Другой вывод состоит в том, что с точки зрения устранения обнаруженного эффекта представляется перспективным использование без сеточных экстракционных систем.

Список литературы

1. Yu. A. Satov et al, Instrum. Exp. Tech. **59**, 3, 412-419 (2016)
2. Yu. A. Satov et al, Instrum. Exp. Tech. **60**, 4, 556-561 (2017)

В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СИСТЕМА ПИТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ С СЕКЦИЯМИ НА СТОЯЧЕЙ И БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ

Проведено численное моделирование характеристик ускорителя, включающего секцию на стоячей волне и секцию на бегущей волне, с питанием от магнетрона. Развязкой магнетрона и высокодобротной секции на стоячей волне служит циркулятор. Предлагаемая система питания обеспечивает повышение общего КПД ускорителя за счёт эффективного использования СВЧ энергии генератора в переходном режиме. Результаты моделирования позволяют определить оптимальные значения параметров секций и элементов системы питания.

V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY

National Research Nuclear University «MEPhI»

ACCELERATOR POWER SYSTEM WITH STANDING AND TRAVELLING WAVE SECTIONS

Characteristics numerical simulation of accelerator including standing wave section and traveling wave section powered by a magnetron was carried out. Insulator of magnetron and high-Q standing wave section is circulator. Proposed power system provides increase in overall efficiency of accelerator due to effective use of generator microwave energy in transition mode. Simulation results allow to determine optimal values of the parameters of sections and power system elements.

Достоинством ускоряющей структуры на стоячей волне является высокий темп ускорения, недостатком – достаточно большая длительность переходного процесса, снижающая общий КПД ускорителя. При использовании в качестве источника СВЧ энергии магнетрона должны быть обеспечены условия отвода энергии, отражённой от секции в переходном режиме, в поглощающую нагрузку. Это достигается при использовании циркулятора. Использование энергии, отражённой от секции в переходном режиме, для ускорения частиц может быть осуществлено при применении секции на бегущей волне вместо поглощающей нагрузки. Это обеспечивает повышение КПД ускорителя. Система питания ускорителя, реализующая указанное преимущество, показана на рис.1. Графики изменения поля в секциях на стоячей волне (СВ), бегущей волне (БВ), ускорителе в целом приведены на рис.2.

В работе проведены расчёты и проанализированы характеристики ускоряющих секций, позволяющие определить требования к ним, при реализации которых достигается оптимальное использование СВЧ энергии

генератора за счёт сокращения длительности переходного режима в ускоряющей системе.

При критической связи секции на СВ с генератором в стационарном режиме отсутствует отражённая в секцию на БВ волна (рис. 4), что не позволяет использовать данную схему ускорения в таком режиме. При недосвязи секции на СВ переходный процесс длится дольше, что сводит на нет преимущество данной схемы ускорения (рис. 3). Перспективным является режим работы при пересвязи секции на СВ. При этом постоянная времени переходного процесса уменьшается. Кроме того, в течении переходного процесса фаза отражённого поля меняется на 180 градусов. Это позволяет в начале переходного процесса использовать секцию на БВ для подкачки секции на СВ дополнительной мощностью.

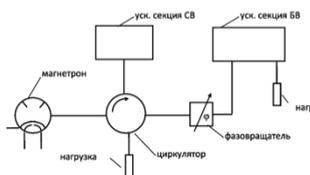


Рис.1.

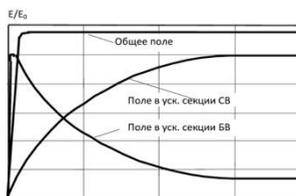


Рис.2.

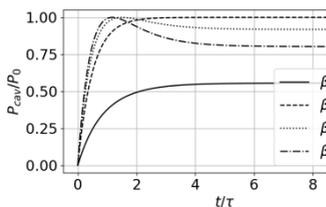


Рис.3.

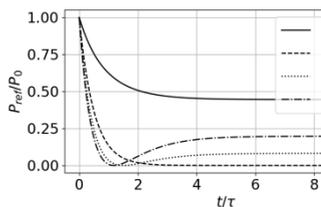


Рис.4.

Список литературы

1. Ускоритель с устройством ВЧ питания. Патент на изобретение №2168291, МКИ H05H7/02

В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛИЗ ДОПУСКОВ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ И РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ ГИБРИДНОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Проведён анализ чувствительности параметров гибридной ускоряющей структуры, состоящей из регулярной секции на бегущей волне и группирующей секции на стоячей волне, к изменениям электродинамических характеристик отдельных ячеек. Проведён анализ допусков на настройку элементов системы питания гибридной ускоряющей структуры. Результаты анализа позволяют определить допуски на изготовление ячеек ускоряющей структуры, а также требования к точности настройки рабочих режимов системы питания.

V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY

National Research Nuclear University «MEPhI»

ANALYSIS OF TOLERANCES ON MANUFACTURING AND OPERATING MODES OF HYBRID ACCELERATING STRUCTURE

Sensitivity of the parameters of hybrid accelerating structure including regular section with traveling wave and bunching section with standing wave to variations in the electrodynamic characteristics of individual cells is analyzed. Analysis of tolerances for tuning elements of power system of hybrid accelerating structure is carried out. Analysis results give possibility to determine tolerances for manufacture of accelerating structure cells, as well as the requirements for tuning accuracy of operating modes of power system.

Гибридная ускоряющая структура включает группирующую на стоячей волне (бипериодическая секция) и секцию на бегущей волне (круглый диафрагмированный волновод) [1]. Такая структура обладает более высоким КПД по сравнению со структурой на бегущей волне и меньшей длительностью переходного процесса по сравнению со структурой на стоячей волне. Повышение КПД достигается тем, что неизрасходованная в секции на бегущей волне мощность передаётся на вход группирующей. Для питания структуры может применяться как автогенератор (магнетрон), так и усилитель (клизотрон). С целью определения граничных требований к элементам высокочастотной системы гибридной ускоряющей структуры ранее проведено расчётное моделирование рабочих режимов системы питания [2].

В работе проведён анализ чувствительности параметров гибридной ускоряющей структуры к изменениям электродинамических характеристик отдельных ячеек. Разработаны алгоритм и программа расчёта ускоряющего поля во входящих в гибридную структуру секциях на бегущей и стоячей волне при вариации резонансных частот отдельных ячеек. Разработанная программа

позволяет также рассчитывать входное сопротивление секций в полосе частот при изменении частот ячеек.

На рис. 1, 2, в качестве примера, приведены результаты расчёта характеристик (ускоряющего поля и модуля коэффициента отражения) секции со стоячей волной из 5 ячеек, на рис. 3, 4 – секции с бегущей волной из 42 ячеек при изменении частот ячеек в диапазоне (2856,0 \square 0,2) МГц.

Созданная программа и полученные результаты позволяют определить допуски на изготовление ячеек ускоряющей структуры, а также требования к точности настройки рабочих режимов системы питания.

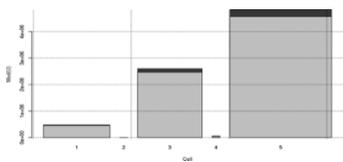


Рис.1.

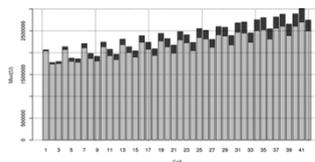


Рис.3.

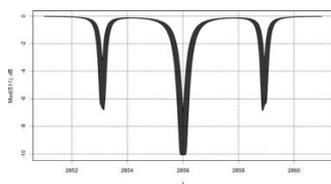


Рис.2.

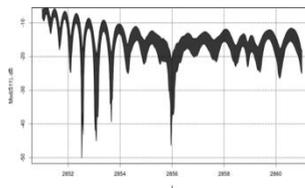


Рис.4.

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. Расчетное моделирование рабочих режимов системы питания гибридной ускоряющей структуры. V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» Лаплаз-2019, Сборник научных трудов, ч.2, М., 2019, с.140 – 141.

Р.Е. НЕМЧЕНКО, М.А. ГУСАРОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПОЛУВОЛНОВОГО РЕЗОНАТОРА.

Представлены результаты механических и электродинамических расчетов устройства подстройки частоты для полуволнового сверхпроводящего резонатора на 325 МГц и относительную скорость 0.21 для инжекционного комплекса мегасайенс проекта Нуклотрон-NICA. Устройство подстройки обеспечивает компенсацию ухода резонансной частоты, обусловленную внешними факторами. Рассмотрены методы подстройки частоты полуволновых резонаторов, выбран наиболее подходящий под условия проекта метод и разработана конструкция устройства подстройки частоты.

R.E. NEMCHENKO, M.A. GUSAROVA

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

DEVELOPMENT OF A TUNING FREQUENCY DEVICE FOR A SUPERCONDUCTIVE HALF-WAVE RESONATOR.

The results of mechanical and electrodynamic calculations for a frequency tuning device for a half-wave superconducting 325 MHz cavity with the beta of 0.21 for NICA are presented. Tuning device provides compensation for a frequency shift caused by external factors. Different frequency tuning methods were considered, of which the one most suited for project's requirements was selected; the design of the frequency tuning device was developed.

Можно выделить несколько типов систем подстройки частоты полуволновых сверхпроводящих резонаторов: Механические – в них подстройка частоты осуществляется за счет изменения длины ускоряющих зазоров и других деформаций резонатора при помощи шаговых моторов [1,2]; Пневматические [3,4]; Ферритовые; Тепловые. Для данного проекта был выбран механический способ подстройки частоты, так как этот способ способен обеспечить требуемый диапазон подстройки частоты 100 кГц, а также наиболее популярен и проработан. Путем прикладывания давления на фланцы пролетного канала моделировались механические деформации резонатора во время подстройки. Таким образом была получена зависимость смещения частоты от изменения длины пролетного канала (рис. 1) и диаграммы напряжений и смещений. Из этих данных было установлено, что максимальное смещение для теплового резонатора не может превышать 1.6 мм, что соответствует смещению частоты примерно 70 кГц. Для резонатора при рабочей температуре 4.2 К такого ограничения нет и можно достичь необходимых 100 кГц. На основе этих данных было разработано устройство подстройки частоты (рис. 2).

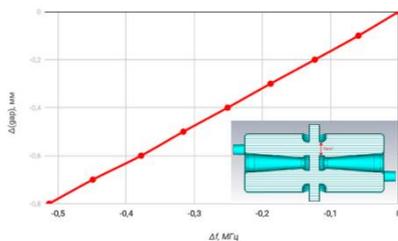


Рис. 1. График зависимости смещения частоты от изменения длины ускоряющего зазора.

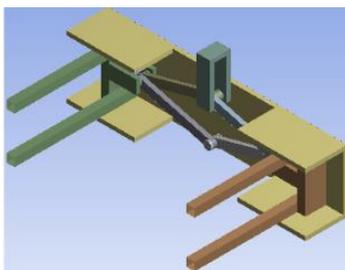


Рис. 2. Устройство подстройки частоты.

Список литературы

1. G. DEVANZ, TUNER DEVELOPMENT AT CEA-SACLAY, TTC KEK 2014
2. G. Ferrand et al., FINAL DESIGN OF THE FULLY EQUIPPED HWR CAVITIES FOR SARAF, Proceedings of LINAC2016, East Lansing, MI, USA, MOPRC025, p.123
3. G. P. Zinkann, S. Sharamentov, B. Clift, AN IMPROVED PNEUMATIC FREQUENCY CONTROL FOR SUPERCONDUCTING CAVITIES, Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, p. 4090
4. K. Saito et al., SRF DEVELOPMENTS AT MSU FOR FRIB, Proceedings of SRF2013, Paris, France, MOP013, p.106

В.В.РАДЕНКО, В.Б.СВИРКОВ, М.В.ДОЛГОПОЛОВ
ООО ТП «Атомные и субатомные технологии», Самара, Россия
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

ЭЛЕКТРОННО-УПРАВЛЯЕМЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ СИНТЕЗ-ГЕНЕРАТОР НЕЙТРОНОВ

Определяется математическая и инженерная модель для обоснования экспериментальной реализации электронно-управляемого импульсного синтез-генератора нейтронов. Описывается разработка предварительных ускорительных систем для ионных потоков.

V. V. RODENKO, V. B. SVIRKOV, M. V. DOLGOPOLOV

Samara POLYTECH, Samara, Russia
Atomic and Subatomic Technologies Platform, Samara, Russia

ELECTRONICALLY CONTROLLED PULSE NEUTRON SYNTHESIS GENERATOR

The mathematical and engineering model is determined to justify the experimental implementation of an electronically controlled pulsed neutron synthesis generator.

Математический аппарат для описания процессов предварительной работы электронно-управляемого импульсного синтез-генератора нейтронов основан на методе формирования дискретных потоков ионов для формирования в магнитооптической ловушке литиевой или тритиевой мишени с программно-заданными параметрами концентрации ионов специально формируемой мишени и направленного потока протонов с реализацией электронно-управляемого ядерного синтеза. Для этого из линейных потоков ионов P_i , формируемых источником ионов с начальным током I_0 , происходит разбиение на потоки I_{01} , I_{02} , ..., I_{0n} , с необходимым периодом следования ($T_{01}...T_{0n}$). Дальнейшее группирование ионных потоков позволяет получить потоки высокой плотности. Требуемые значения энергии E_k частиц достигаются заданием определенных параметров ускоряющего напряжения импульсного линейного электростатического ускорителя. Изменение значений ускоряющего напряжения от U_{min} до U_{max} позволяет формировать для каждого единичного потока значения от E_{min} до E_{max} таким образом, что в магнитооптической ловушке, используя разность хода первого и n -го потока при заданной напряженности магнитного поля, возможно уплотнять поток до достаточных значений для получения синтеза ядер.

Генератор нейтронов состоит из трёх секций синтез-генератора. В первом формируется поток протонов, а во втором поток ионов мишени. Поток ионов в синтез-генераторе состоит из литиевой и дейтериевой компонент. Слой литий-

дейтериевой компонент - со средней энергией 200 кэВ. Третья секция формирует верхний плотный слой литиевой или бор плазмы со средней энергией 250 кэВ для экранирования дрейфовых нейтронов. Направленный поток нейтронов с энергией 12 МэВ генерируется синтез-генератором.

Реакция для генерации нейтронов: $d+{}^7\text{Li}\rightarrow 2{}^4\text{He}+n + 15 \text{ МэВ}$. Экранирование нейтронного потока плотной плазмой за счет реакций с нейтронами.

Из потока дейтериевой и тритиевой плазмы, где ядерная реакция происходит при бомбардировке потоком дейтронов плазменной тритиевой мишени: $d+t\rightarrow {}^4\text{He}+n + 17.6 \text{ МэВ}$. Эта реакция экзотермическая и может протекать при сколь угодно малых энергиях дейтронов.

Диапазон полного сечения реакции, в 10^{24} см^2 , от энергии дейтронов E_d , кэВ, в пределах до 300 кэВ. В сравнении с генерацией нейтронных импульсов с длительностью $1\div 100 \text{ нс}$ с использованием малогабаритных вакуумных ускорительных трубок, где возможно (DT реакция, 300 кВ), выход нейтронов составляет $2\cdot 10^7 \text{ н/имп}$. В синтез-генераторе происходит формирование ускоренных пучков ионов лития, дейтерия и трития, а затем формирование плотной ионной или плазменной мишени и плотного набегающего потока, что позволяет формировать импульсы нейтронов от единиц секунд до миллисекунд и от $2\cdot 10^{10} \text{ н/имп}$ до $2\cdot 10^{14} \text{ н/имп}$.

Утилизация части энергии синтеза происходит путем преобразования энергии мощными пролетными СВЧ-приборами – клистроны, работающими на преобразовании кинетической энергии ионов в СВЧ-колебания.

Список литературы

1. Mikhail Dolgoplov, Albina Gurskaya, Andrey Privalov, Vitaly Radenko, Alexandr Radenko and Vasily Svirkov // EPJ Web Conf., 222 (2019) 02014
2. Forrester A.T. // Physics Today. V. 42. 1987.

В.В.РАДЕНКО, В.И.ЧЕПУРНОВ, А.В.ГУРСКАЯ, М.В.ДОЛГОПОЛОВ
ООО ТП «Атомные и субатомные технологии», Самара, Россия
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
ООО «БетаВольтаика», Самара, Россия

МАГНИТООПТОДИНАМИЧЕСКАЯ КАМЕРА СИНТЕЗА

В данной работе показано, что синтез C-14 может быть осуществлен с помощью электронно-управляемой магнитооптической камеры.

**V. V. RADENKO, V. I. CHEPURNOV, A. V. GURSKAYA,
M. V. DOLGOPOLOV**

Atomic and Subatomic Technologies Platform, Samara, Russia
Samara POLYTECH, Samara, Russia
BetaVoltaics LLC, Samara, Russia

MAGNETO OPTIC SYNTHESIS CHAMBER

The synthesis of C-14 can be performed by using the electronically controlled magneto-optic chamber.

Синтез углерода-14 может быть осуществлен с помощью электронно-управляемого синтеза нуклонов в 8-циклической магнитооптической синтезирующей камере [1-4]. Генерация протонного потока для синтеза нейтронов литий-ионной мишенью в результате уплотнения первичного потока протонов и выборка параметров, определяющих плотность и среднюю энергию потока. Электронно-управляемые потоки формируются в параметрах периода повторения T_{sl} и частоты дискретных потоков w_{sl} . Генерация плотного протонного потока для синтеза нейтронов с помощью литий-ионных мишеней. Реакция синтеза на мишени плотных ионов азота.

Устройство состоит из электронно-управляемых источников ионов с магнитооптическим потоком концентрации с энергией ионов до 50 кэВ, электронно управляемые импульсные ускорители секций, формирующие дискретный поток ионов с энергией ионов от 200 до 600 кэВ, совмещенные с 8-циклическим магнитооптической синтезирующей камерой и управляемая магнитодинамическая ловушка для генерации плотных нейтронных потоков [2]. Синтез C-14 нейтронами идет в 4-х цикловой магнитооптической камере на плотной ионной мишени. На заключительном этапе C-14 из магнитооптического накопителя осаждается на подложку SiC. Возможно также многослойное формирование C-14 на подложке SiC или на подложках из других материалов.

Полная энергия набегающего потока и мишени выше энергии кулоновского отталкивания. Плотность Ni набегающего потока и мишени при импульсной работе равна или превышает 10^{22} см⁻³. Время удержания в магнитооптической

камере при $\tau \geq 1$ с на один ядерный цикл. Имеется возможность генерировать 8-циклоый синтез частиц различных классов. Поддержка дейтерий-литиевых реакций синтеза со временем удержания в системе выше магнитооптического с один цикл составляет 5 секунд.

Список литературы

1. Physics and Technology of Ion Sources, 2nd, Revised and Extended Edition. Ian G. Brown (Editor). 396 pages. October 2004.
2. Akimchenko A., Chepurnov V., Dolgoplov M. etc. // EPJ Web of Conferences. - 2017. - Vol. 158.
3. Mesyats Gennady A. Pulsed power. Springer. 2005. 568 p.
4. Forrester A.T. // Physics Today. V. 42. 1987.

Н.Е. РОЗАНОВ

Московский радиотехнический институт Российской Академии Наук, Москва, Россия

ПРИКЛАДНЫЕ РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТОЙ, ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Проведены расчеты характеристик электронного пучка в ускорителе стерилизационной установки с локальной радиационной защитой и ВЧ фокусировкой. Целью является уменьшение габаритов защиты путем уменьшения энергии пучка в укороченной ускоряющей структуре. Показано, что при этом возможно получение достаточных величин тока и мощности пучка. Проанализирована роль эффекта "нагрузки током".

N.E. ROZANOV

Moscow Radiotechnical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

APPLIED CALCULATIONS OF ACCELERATOR CHARACTERISTICS FOR STERILIZATION INSTALLATION WITH LOCAL RADIATION SHIELDING, SECOND PART

The calculations of electron beam characteristics in the accelerator of sterilization installation with the local radiation shielding and RF focusing are carried out. The aim is to reduce the size of the shielding by reducing the beam energy in a shorted accelerating structure. It is shown that it is possible to obtain sufficient values of current and power of the beam. "Beam current loading" effect is analyzed.

Для облучения и стерилизации объектов, имеющих меньшие габариты и массу, достаточно ускорять электронный пучок до меньших энергий. Следствием этого может стать уменьшение габаритов радиационной защиты установки, что привлекательно с точки зрения ее размещения в помещениях меньшей площади. Применительно к этой возможности проведены расчеты характеристик электронного пучка в ускорителе с ускоряющей структурой меньшей длины, чем в нынешней установке. Сделано это простейшим образом: уменьшением количества ячеек структуры, без изменения ее группирующей части. Расчеты проведены с помощью комплекса программ "DINA" [1], в том числе, с учетом эффекта "нагрузки током" [2-4]. Результаты состоят в том, что очевидное уменьшение энергии пучка сопровождается заметным увеличением ускоренного тока и небольшим ростом КПД ускоряющей структуры. Причина состоит в том, что заданная фиксированная СВЧ мощность, "закачиваемая" в структуру на стоячей волне, перераспределяется, вследствие уменьшения энергии пучка, в сторону увеличения ускоренного тока. При этом импульсная мощность ускоренного пучка и омические потери СВЧ энергии в стенках структуры меняются мало. А амплитуда электрического поля растет. Последнее

может оказаться недопустимым по причине увеличения вероятности пробоев в структуре. Для того чтобы этого избежать, можно рассмотреть возможность работы с меньшей СВЧ мощностью, закачиваемой в структуру. Магнетрон МИ456А, используемый в установке, позволяет это, в принципе, делать. Расчеты показали, что такая модификация способа возможна. Например, в структуре из 7 ячеек с СВЧ мощностью 1.3 МВт амплитуда поля остается "штатной", пучок ускоряется до средней по спектру энергии 2.8 МэВ, имеет ток 280-300 мА, т.е. импульсную мощность около 0.8 МВт, а КПД ускоряющей структуры равен примерно 60%.

"Нагрузка током", как уже было показано в [3], в структуре на стоячей волне не приводит к подсадке амплитуды поля. Ведь в этом случае уменьшались бы омические потери СВЧ мощности в стенках структуры и мощность ускоренного пучка, что не реализуемо при фиксированной закачиваемой СВЧ мощности. Поэтому влияние "нагрузки током" сводится [3] к единственному эффекту: "сдвигу", т.е. изменению, частоты суммарного поля при неизменных остальных характеристиках пучка и поля. В описанном варианте частота увеличивается примерно на 1 МГц.

Список литературы

1. Розанов Н.Е. Компьютерные программы DINA для расчета динамики сильноточных пучков в линейных ускорителях. Научная сессия МИФИ-2002. Сборник научных трудов. М.: МИФИ, 7, 124 (2002).
2. Розанов Н.Е. Развитие теории нагрузки током в электронных ускорителях на стоячей волне. Научная сессия МИФИ-2015. Сборник научных трудов. М.: МИФИ, 2, 203 (2015).
3. Розанов Н.Е. Влияние нагрузки током в электронных ускорителях на стоячей волне. Вторая международная конференция "Плазменные, лазерные исследования и технологии". Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2016 г., с.180.
4. Rozanov N.E. Applied calculations of accelerator characteristics for sterilization installation with local radiation shielding. Journal of Physics: Conference Series. 2019, v.1239, n.1, 012078, c.1-4.

И.В. РЫБАКОВ, В.В. ПАРАМОНОВ
Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ УЗЛА СОГЛАСОВАНИЯ СЕКЦИИ РЕЗОНАТОРА CDS И МОСТОВОГО УСТРОЙСТВА

На основе аналитической модели многомодового приближения для неоднородной связанной системы разработана методика настройки узла согласования мостового устройства с секцией резонатора CDS. Конструкция узла согласования определяет условия чувствительности рабочей моды к элементам подстройки, расположения соседних к ней мод и долю ВЧ потерь в мостовом устройстве при вводе мощности в резонатор. Приведены результаты оптимизации узла согласования по этому комплексу противоречивых условий.

I.V. RYBAKOV, V.V. PARAMONOV

Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, Russia

COUPLING ZONE OPTIMIZATION OF CDS CAVITY SECTION AND BRIDGE DEVICE

On the basis of multi mode analytical model a technique for coupling zone of bridge device and CDS cavity section tuning. Construction of the coupling zone defines the conditions of tuning elements sensitivity for operating mode, position of side modes and RF losses proportion in the bridge device at power input into the cavity. Results of the coupling zone optimization for this complex of contradictory conditions are presented.

При разработке четырех секционного резонатора на основе секций CDS для первого резонатора основной части линейного ускорителя ИЯИ РАН предполагается использование мостовых устройств, аналогичных существующим, состоящим из отрезков волновода прямоугольного сечения [1]. Для моделирования и настройки системы из четырех неравнозначных секций, соединенных тремя мостовыми устройствами, была предложена аналитическая модель для неоднородной связанной системы на основе многомодового приближения [2]. Целью настройки системы из секций резонатора и мостовых устройств является достижение параметров узла соединения, при которых частота рабочей моды равноудалена от частот соседних мод системы. Это достигается за счет использования различной длины щели связи и положения плунжера в трубке переходной части мостового устройства. Подстройка частоты рабочей моды до номинального значения 991 МГц осуществляется радиусом концевых полу ячеек секции.

Ввод мощности в разрабатываемый резонатор CDS осуществляется в центральное мостовое устройство, соединяющее вторую и третью секции [3]. Для этого в проекте существующего резонатора на основе секций УСШД установлено отношение мощности потерь в мостовом устройстве к мощности

потерь в секции не превышающее 8%. При использовании в переходной части мостового устройства отрезка волновода прямоугольного сечения, в новом резонаторе CDS это отношение составляет не менее 9%. Для уменьшения отношения было предложено использовать в переходной части мостового устройства модифицированный отрезок волновода, разделенный на четыре части с постепенным уменьшением ширины в два раза, как это показано на рис. 1а. На рис. 1б приведено сравнение зависимостей отношения мощности потерь в мостовом устройстве к мощности потерь в секции от длины переходной части $L1$ при различной длине щели связи для случаев использования отрезка волновода и модифицированного отрезка волновода.

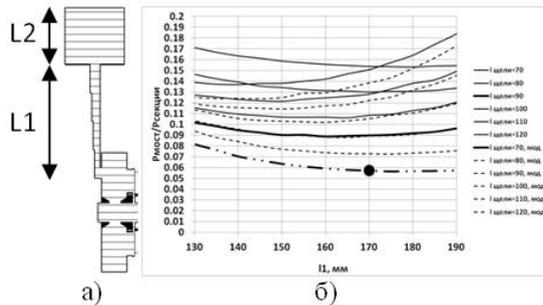


Рис. 1. а) модифицированный переходный участок мостового устройства; б) диаграммы зависимости отношения мощностей потерь от длины переходной части мостового устройства

При использовании модифицированного переходного участка мостового устройства удается достичь меньшего значения отношения мощностей потерь, которое при длине $L1=170$ мм и длине щели 70 мм составляет 5,7%.

Предложена методика, позволяющая настроить рабочую частоту в четырех секционном резонаторе CDS и обеспечить ввод мощности в него.

Список литературы

1. V. Andreev et al.// The bridge device for accelerating structures, RTI USSR, N20, 1974, pp.47-55.
2. I.V. Rybakov et al.// Proc. RuPAC'18, pp 216-218.
3. V. V. Paramonov, L. V. Kravchuk and I. V. Rybakov// Physics of Particles and Nuclei Letters, 2018, Vol. 15, No. 7, 2018, pp. 915–918.

В.М. СКОРКИН

ФГБУН Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

НЕЙТРОННЫЙ МОНИТОРИНГ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ

Выполнен нейтронный мониторинг транспортировки пучка сильноточного линейного ускорителя протонов в экспериментальном комплексе ИЯИ РАН. Измерялись потоки быстрых нейтронов от потерь пучка протонов в каналах транспортировки с помощью системы детекторов УДБН-02Р. В режиме реального времени определялись локальные потери пучка, состояние элементов формирования пучка.

V.M. SKORKIN

Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia

NEUTRON MONITORING FOR TRANSPORT OF PROTON LINAC BEAM

Neutron monitoring of the beam transport of a high-current linear proton accelerator was performed in the experimental complex of the INR RAS. The fast neutron fluxes from the losses of the proton beam using the UDBN-02R detector system in the transport channels were measured. In real time, the local beam losses and the state of the beam forming elements were determined.

При транспортировке сильноточного пучка протонов линейного ускорителя до мишеней установок экспериментального комплекса возникает нейтронное излучение от потерь пучка на конструкциях ионопровода, формирующих и диагностирующих элементах транспортного канала. Взаимодействие протонов с материалом конструкций каналов создает потоки быстрых нейтронов, основную часть которых составляют испарительные нейтроны с изотропным распределением и энергией ~ 1 МэВ. Часть нейтронов проходят через биологическую защиту каналов и создают радиационный фон в экспериментальном зале. Контроль за нейтронным фоном осуществляется с помощью системой радиационного контроля на основе детекторов быстрых нейтронов УДБН-02Р.

В работе для мониторинга проводки пучка и измерения его потерь детекторы УДБН-02Р были размещены в транспортных каналах около элементов формирования и диагностики пучка, а также вблизи активированных участков ионопровода, вызывающих потери пучка.

В режиме реального времени измерялась мощность дозы нейтронного излучения в каналах транспортировки пучка протонов. Было установлено, что мощность дозы нейтронов определялась средним током пучка протонов

линейного ускорителя и пропорциональна частоте импульсного тока при 1 Гц, 10 Гц, 25 Гц и 50 Гц (Рис. 1).

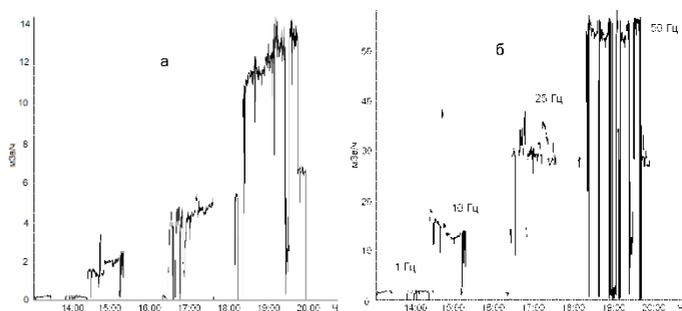


Рис.1. Мощность дозы нейтронного излучения в конце тоннеля ускорителя (а) и в канале транспортировки пучка на экспериментальную установку ИН-06 (б) при токе 0.6 мкА, 6 мкА, 15 мкА, 30 мкА (1 Гц, 10 Гц, 25 Гц и 50 Гц).

На всех участках транспортировки потери пучка не зависели от среднего тока пучка и определялись параметрами формирующего элемента. Потери пучка коррелировали с уровнем наведённой активности участка канала. Максимальные потери пучка в канале транспортировки на установку ИН-06 составили 0.4% вблизи поворотного магнита 1МС3.

Исследования выявили временную зависимость нейтронного излучения и, следовательно, потерь пучка вблизи профилометра ПЕ2И в канале транспортировки на ИН-06 из-за нестабильной работы формирующих устройств перед линзой Л78. Это приводило к изменению тока пучка на мишени ИН-06 (Рис. 2).

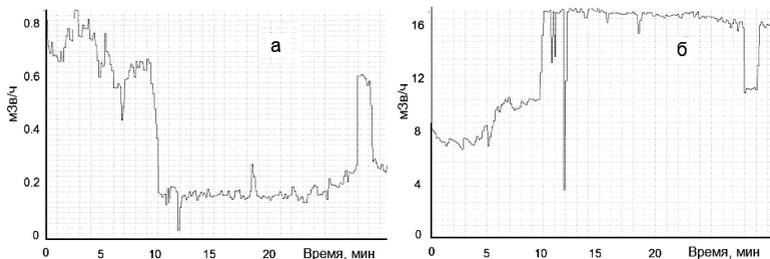


Рис.2. Диаграммы мощности дозы нейтронного излучения в канале транспортировки пучка (а) и на экспериментальной установке ИН-06 (б).

Временная зависимость интенсивности нейтронного излучения вблизи линзы Л78 анти-коррелировала с зависимостью интенсивности нейтронов на установке ИН-06.

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, М.И. ЖИГАЙЛОВА,
Д.Е. РОНИН, В.В. ТЕЛЯТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КОМПАУНДА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Проведено теоретическое обоснование процесса СВЧ-обработки цементных растворов для повышения прочности изделий на их основе. Выполнена обработка цементных компаундов на экспериментальной СВЧ-установке. Исследована прочность обработанных и контрольных необработанных образцов.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, M.I. ZHIGAILOVA,
D.E. RONIN, V.V. TELYATOV

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

PRODUCTION OF CEMENT COMPOUND OF HIGHER STRENGTH FOR USE IN RADIOACTIVE WASTE PROCESSING TECHNOLOGIES

A theoretical justification of the microwave processing of cement mortars to increase the strength of products based on them. The processing of cement compounds was carried out on an experimental microwave setup. The strength of the treated and control untreated samples was investigated.

Требование изоляции жидких радиоактивных отходов (ЖРО) обуславливает необходимость перевода радионуклидов и других соединений в твердые матрицы с минимизированием выхода радионуклидов. Одним из способов переработки жидких РАО является цементирование, в котором радиоактивные вещества смешиваются с цементным раствором. При введении радиоактивных солей в раствор прочность цементного компаунда уменьшается, при этом, в соответствии с НП-019-2000, прочность цементированных отходов не должна быть меньше 4,9 МПа (50 кгс/см²). Повышение прочности конечного продукта позволяет увеличить степень включения радиоактивных солей в цементный компаунд.

Авторами проекта показана принципиальная возможность модифицирующего воздействия на растворы, приводящего к увеличению прочности цементного камня и бетона [1].

Авторами проекта выполнено научное обоснование процесса СВЧ-обработки цементных растворов для повышения прочности изделий на их основе. Показаны механизмы воздействия, приводящие к модификации процессов, проходящих при гидратации цемента.

Разработан и создан экспериментальный макет опытного образца СВЧ-установки для проточной обработки растворов. Создан основной элемент макета – специальная волноводная нагрузка. Проведено экспериментальное исследование макета на низком и высоком уровне мощности. Достигнутый КПД установки по СВЧ-мощности составил 93 %.

Проведена обработка цементных компаундов и бетонов на экспериментальной СВЧ-установке при различных значениях удельной мощности и времени воздействия. Выполнено исследование прочности обработанных и контрольных необработанных образцов.

Анализ полученных результатов подтверждает наличие оптимальных условий для воздействия МВИ на растворы. Наибольшее повышение прочности происходило при выходной удельной мощности СВЧ-генератора, составляющей 1 кВт/л раствора, при нахождении раствора в поле СВЧ-излучения в течение 20 с, соответствующее изменению температуры раствора в процессе обработки на 10 °С. Затраченная удельная энергия составила 20 кДж/л. В лучшей серии, признанной оптимальной по условиям процесса, получено увеличение прочности цементных образцов на 36 % по сравнению с контрольными.



Рис.1 Специальная волноводная нагрузка с установленной на ней системой подачи раствора

Список литературы

1. Диденко А.Н., Дмитриев М.С., Дьяконов М.В. и др. // Атомная энергия, 2017. Т. 123, № 3. С. 176-177

А.С. БОГОМОЛОВ¹, Т.С. БАКИРОВ¹, П.К. БОГДАНОВ²

¹бывшие сотрудники СО РАН, ²бывший сотрудник АО «ГНЦ РФ ФЭИ»

О ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ПРОТОНОВ НА ОБРАТНОЙ ВОЛНЕ (УЛОВ)

В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования УЛОВ с $I_{\text{imp}} = 1200$ мА на ускоряющих структурах (УС) с отрицательной дисперсией (модифицированные встречно-штыревые структуры) для применения при комнатной температуре и с устранением радиочастотных тепловых потерь в УС потоком воды. Расчетные значения электронной эффективности УС - $\eta_e > 97\%$, общей эффективности УЛОВ - $\eta_{\Sigma} > 40\%$ ($f_{\text{RF}} = 1300$ МГц), отсутствуют потери частиц. Конструкция компактна. Ожидаемая стоимость 1 ГэВ УЛОВ со средней мощностью протонного пучка 150 МВт составляет около \$ 150 млн.

This paper presents the results of the computer simulation of the BWLAP linac with $I_{\text{imp}} = 1200$ mA (duty factor - 12.5%) on accelerating structures (AS) with negative dispersion (Modified Interdigital Structures) at room temperature, and with removal of RF heat losses in the AS by the water flow ($T \sim 300\text{K}$). The calculated values of the electronic efficiency of the AS - $\eta_e > 97\%$, and the overall efficiency of the accelerator (complex) - $\eta_{\Sigma} > 40\%$ ($f_{\text{RF}} = 1300$ MHz), as well as there is no particle loss. The design is compact. Expected cost of the 1 GeV BWLAP (BTW) linac with proton beam average power 150 MW is about \$150M.

Из уравнения (1) для η_e следует, что электронная эффективность может быть увеличена за счет уменьшения амплитуды ускоряющей E_z (как сделал Jameson), увеличения шунтового сопротивления Z_{sh} (как применяют в ЛУ на СПС) или увеличения тока пучка $I_{\text{имп}}$ (как предложено в УЛОВ).

$$\eta_e = P_{\text{пучка}} / P_{\text{ВЧ}} \approx I_{\text{имп}} / (I_{\text{имп}} + I_{\text{wall}}) \approx I_{\text{имп}} / (I_{\text{имп}} + E_z / Z_{\text{sh}}) \quad (1)$$

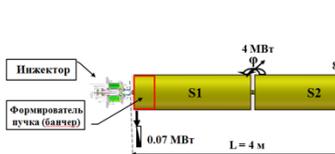
1. $\downarrow E$ (ЛУ 300K, $E < 1$ МВ/м Jameson, LASL, 1992)
2. $\uparrow Z_{\text{sh}}$ (СПЛУ, $E > 10$ МВ/м, ограничение $I_{\text{имп}} \leq 125$ мА)
3. $\uparrow I_{\text{имп}}$ (УЛОВ, $E > 10$ МВ/м, $I > 1000$ мА)

Современный уровень достижений, обеспечивающий создание высокоинтенсивных линейных ускорителей ионов (протонов), связан с проектами Лосс-Аламосской национальной лаборатории США: проект «АРТ» (1600 МэВ, 100 мА, Jameson) и «Project X» (3 ГэВ, 100 мА, Bowman) [1] и, конечно, построенной в 2000 г. и испытанной начальной частью проекта «АРТ» - линейным ускорителем «LEDA» (6.7 МэВ, 100 мА CW). При этом повсеместно применяется метод ускорения ионов «на стоячей волне», т.е. все линейные ускорители ионов в мире «однотехнологичны».

Вплоть до настоящего времени, только ЛУ "LEDA" (США) обеспечивает протонный пучок с током 100 мА (CW).

Впервые в мире примененный нами Метод [2] и Компоновка линейных ускорителей ионов (протонов) на обратной бегущей волне (УЛОВ), в отличие от метода «на стоячей волне» с использованием сверхпроводящих УС, позволяют в «теплой» структуре (во встречно-штырьевой) увеличить шунтовое сопротивление и ускорять нетипично большие токи - с увеличением импульсного тока имеет место рост электронного к.п. д. (η_e) УЛОВ до 98% и более - что, в свою очередь, позволяет получить общий КПД порядка 40% и решить проблему теплосброса с УС потоком воды.

В работе подробно рассмотрены характеристики начальной части, высокоинтенсивного ЛУ – первые две секции – со следующими характеристиками:



ТТХ протонного пучка: $E = 6.5 \text{ МэВ};$

$I_{\text{имп}} = 1203 \text{ мА}$ $P_{\text{имп}} = 7.8 \text{ МВт}$

$I_{\text{сред}} = 150 \text{ мА}$ $P_{\text{сред}} = 1 \text{ МВт}$
(СКВ.- 8)

длительность импульса - 10 мсек

"Теплый", частота 1300 МГц,
 $L = 4 \text{ м}$

2 клистрона ТН 2113 (4 МВт/0.5 МВт)

В секции S2 потери пучка отсутствуют

Мы призываем разработчиков линейных ускорителей ионов (для промышленности и фундаментальной науки) заняться разработкой линейных ускорителей УЛОВ и надеемся, что вложенные усилия быстро окупятся и произойдет прорыв в светлое будущее.

Список литературы

1. Ch. D. Bowman, Roll. P. Johnson, Accelerators for Subcritical Molten-Salt Reactors, Proc. of 2011 Particle Accelerator Conf., pp 2181-2183, N.Y., U.S.A.

2. А.С. Богомолов, Способ ускорения тяжелых заряженных частиц, авт. свид. СССР №269369, 18.02.1969.

**Секция
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

Руководитель секции

– к.т.н., заведующий
кафедрой №24, Юрков
Дмитрий Игоревич

Секретарь секции

– д.т.н., профессор
Масленников Сергей
Павлович

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9796

E-mail: SPMaslennikov@mephi.ru

И.Н. АБАЛАКИН¹, Е.В. РЯБЕВА¹, В.Т. САМОСАДНЫЙ¹,
А.В. СУМИН²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
²АО «НИИТФА», Москва, Россия

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ КЛИНИЧЕСКИЙ ДОЗИМЕТР ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ В ЗОНАХ МЕДИЦИНСКОГО ИНТЕРЕСА – ОПУХОЛЯХ И ОРГАНАХ РИСКА

В работе приводятся результаты калибровочных испытаний разработанного многоканального клинического дозиметра МКД-04 с детекторами на основе сцинтилляционного эффекта. Детекторы ионизирующего излучения включают в себя пластиковое сцинтилляционное волокно (диаметр 0,5-1 мм, длина 5-10 мм), прикрепленное с помощью эпоксидного оптического радиационно-стойкого клея к оптическому волокну (диаметр 0,5-1 мм, длина 0,5-1 м). Сцинтиллятор и оптические волокна помещены в светоизолирующую оболочку, где дополнительно находится оптоволокно для нейтрализации эффекта Черенкова. Также представлены результаты измерений в радиационном поле ⁶⁰Со в пластиковых и водном фантомах. Показания МКД-04 сравнивались с показаниями ионизационной камерой PTW Semiflex 0,125 см³ PTW UNIDOS T10021. Показания МКД-04 совпадают с показаниями дозиметра UNIDOS в диапазоне 5 – 2000 мГр/мин. Максимальное отклонение от показаний PTW Semiflex на краях этого диапазона: ±1%.

I.N. ABALAKIN¹, E.V. RYABEVA¹, V.T. SAMOSADNY¹,
A.V. SUMIN²

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

²JSC «NIITFA» (National Research Institute of Technical Physics and Automation), Moscow,
Russia

MULTICHANNEL CLINICAL DOSIMETER FOR MONITORING OF ABSORBED DOSES IN MEDICAL INTEREST AREAS OF – TUMORS AND RISK ORGANS

The paper presents the results of calibration tests of the developed multi-channel clinical dosimeter MCD-04 with detectors based on the scintillation effect. Ionizing radiation detectors include a plastic scintillation fiber (diameter 0.5-1 mm, length 5-10 mm) attached with an epoxy optical radiation-resistant adhesive to an optical fiber (diameter 0.5-1 mm, length 0.5 - 1 m). The scintillator and optical fibers are placed in a light-insulating shell, where the optical fiber is additionally located to neutralize the Cherenkov effect. The results of measurements in the radiation field of ⁶⁰Co in plastic and water phantoms are presented. The MCD-04 readings were compared with those of the PTW Semiflex 0.125cm³ PTW UNIDOS T10021 ionizing camera. The MCD-04 readings coincide with the UNIDOS dosimeter readings in the range of 5-2000

Mgr / min. Maximum deviation from the PTW Semiflex readings at the edges of this range is \pm 1%.

К детекторам, применяемым в in-vivo дозиметрии, предъявляется множество требований: точность, радиационной стойкость, ход жесткости, угловая зависимость, тканезквивалентность, удобство в эксплуатации в условиях клиники, коммерческая доступность [1]. Анализ литературы показывает, что наиболее оптимальными характеристиками обладают новые малогабаритные модификации пластиковых сцинтилляционных детекторов [2-3]. Их можно использовать не только для in-vivo on-line дозиметрии, но и при исследованиях в фантоме, при проверке работы систем дозиметрического планирования и оборудования для брахитерапии.

Авторами разработан многоканальный клинический дозиметр МКД-04, а также детекторы на основе сцинтилляционного волокна BSF-10 диаметром 1 мм. Детекторы имеют варианты исполнения с диаметром чувствительной части 3,2 и 4 мм. Диапазон измерения мощности дозы МКД-04 от 10 до 5000 мГр/мин. МКД-04 позволяет производить контроль мощности дозы и дозы в нескольких точках одновременно в режиме реального времени. При необходимости дозиметр может иметь библиотеку параметров для различных методик in-vivo дозиметрии.

Были проведены успешные испытания дозиметра по сертификации на тип средства измерения. Клинические испытания прибора проводились на фантомах, имитирующих организм человека с использованием аппаратов для брахитерапии Агат-ВТ (^{60}Co), РОКУС-АМ и Selectron (^{192}Ir).

Список литературы

1. Semenov U.V. and others // Medical radiology and radiation safety, 2006. Vol 51, P. 6.
2. Lambert J. and others // Phys. Med. Biol., 2006. Vol 51, P. 5505–5516.
3. Therriault-Proulx F. and others // Med. Phys., 2011. Vol 38, P. 2542–2551.

А.Г. АМУРСКИЙ¹, М.В. РЕВЯКИН¹, Е.М. ТЮРИН²

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

МОНИТОР БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ СКВАЖИННОГО ГЕНЕРАТОРА С ГАЗОНАПОЛНЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКОЙ

Применительно к особенностям скважинной геофизической аппаратуры исследованы характеристики алмазного монитора потока быстрых нейтронов генератора с газонаполненной нейтронной трубкой (ГНТ). Исследовались параметры детекторов с пластинами натурального и искусственного алмаза, определено оптимальное расстояние от детектора до мишени ГНТ, оценено влияние эффекта поляризации алмаза, определено влияние на точность измерений изменения параметров окружающей среды, получена линейная калибровочная зависимость счета импульсов алмазного монитора от потока нейтронов.

A.G. AMURSKIY¹, M.V. REVYAKIN¹, E.M. TYURIN²

¹*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov
(FSUE VNIIA), Moscow, Russia*

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

FAST NEUTRON MONITOR FOR A WELL-GENERATOR WITH A GAS-FILLED NEUTRON TUBE

In relation to the features of borehole geophysical equipment, the characteristics of a diamond monitor of the fast neutron flux of a gas-filled neutron tube (GNT) generator are studied. The parameters of detectors with natural and artificial diamond plates were studied, the optimal distance from the detector to the GNT target was determined, the effect of the diamond polarization was evaluated, the influence on the measurement accuracy of environmental parameters changes was determined, a linear calibration dependence of the diamond monitor pulse count on neutron flux.

Аппаратура импульсного нейтронного каротажа (ИНК) применяется для геофизических исследований нефтегазовых и рудных скважин и включает импульсный генератор 14 МэВ нейтронов. Для обеспечения высокой точности определения характеристик пластов горной породы необходимо нормировать результаты измерения скоростей счета и спектров излучений на величину нейтронного потока генератора. Результаты измерения потока нейтронов при каротаже, могут также использоваться и для технической диагностики генератора нейтронов, контроля его нестабильности и регулирования его параметров. Скважинный монитор нейтронов разрабатывался с учетом условий измерений при каротаже: повышенная рабочая температура 120-150С;

изменение в процессе перемещения скважинного прибора параметров окружающей среды; повышенный радиационный ресурс чувствительного элемента детектора. Указанным требованиям отвечают детекторы быстрых нейтронов с алмазным чувствительным элементом. Такие мониторы применяются в составе современной зарубежной скважинной аппаратуры с генераторами нейтронов.

Целью работы являлось получение исходных данных для разработки конструкции алмазного монитора для генератора с ГНТ и методики обработки результатов измерений нейтронного потока в процессе каротажа.

В работе представлены результаты, полученные при измерениях в нормальных климатических условиях с макетами мониторов и двумя видами алмазных чувствительных элементов. Спектрометрический детектор включал алмазную пластину с электрическими обкладками и зарядочувствительный усилитель. С помощью амплитудного анализатора регистрировался спектр электрических импульсов, вызванных в алмазной пластине быстрыми нейтронами. Расчетной величиной для измерения потока быстрых нейтронов являлась суммарная скорость счета импульсов спектра нейтронов выше порога $E_{пор}$.

В результате исследований с несколькими образцами генераторов, отличающихся диаметром и частотным режимом, получено, что монитор с CVD алмазом обеспечивает высокую линейность калибровочной зависимости “скорость счета быстрых нейтронов – поток нейтронов генератора”. Погрешность измерения потока из-за нелинейности калибровочной характеристики при $E_{пор} > 0.5$ МэВ не превышает 1%. Влияние эффекта поляризации алмаза под действием нейтронного облучения необходимо учитывать только для натурального алмаза. Для двух условий измерений: прибор “в воде” и прибор “на воздухе” различие в показаниях не превышает 10% при регистрации интегрального счета импульсов и исключается при регистрации импульсов с порогом 1,2 МэВ. В результате выполненных работ получены исходные данные для разработки конструкции монитора потока быстрых нейтронов генератора с ГНТ в процессе каротажа. Дополнительные исследования должны быть направлены на создание термостойкого варианта монитора.

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

*АО «Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения» АО
“СНИИП”, Москва, Россия*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ДОЗИМЕТРИИ

Разработана схема электрическая принципиальная узла управления нагревом. Рассчитаны оптимальные параметры индуктора. Макет установки индукционного нагрева создан и исследован. Рассмотрены способы улучшения КПД нагревателя.

**A.V. BOYKO, V.P. KIREEV, V.G. KOVALENO,
S.A. KORNIIEVSKY**

*Specialized Scientific Research Institute for Instrumentation Engineering
JSC “SNIP”, Moscow, Russia*

USING OF INDUCTION HEATING IN THE TERMOLUMINESCENCE DOSIMETRY

An electrical schematic diagram of the heating control unit has been developed. The optimal parameters of the inductor are calculated. The layout of the induction heating installation was created and investigated. Methods for improving the efficiency of the heater are 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.

Термолюминесцентным детектором является люминофор, который под действием нагрева излучает видимый свет в спектральном диапазоне 250-600 нм, считываемый ФЭУ. ТЛД находится на оптической оси с ФЭУ и нагревателем. Для проведения измерений необходим регулируемый нагрев детектора до 300 °С. Индукционный нагреватель, по сравнению с другими используемыми нагревателями, обладает следующими преимуществами: малые габариты и вес, низкая себестоимость, отсутствие фонового излучения, высокая максимальная скорость нагрева.

Для изучения индукционного нагрева было решено создать макет установки индукционного нагревателя. Макет состоял из индуктора и узла управления нагревом. Индуктор состоял из сердечника и обмотки. В качестве сердечника использовалась ферритовая чаша высотой 5 мм. Для охлаждения индуктора использовались элемент Пельтье и радиатор. Детектор был закреплен на тонкой круглой никелевой подложке диаметром 1 см. Пластина была зафиксирована над пазом ферритовой чаши на расстоянии 2 мм. Для управления нагревом использовалась схема двухконтактного «полумостового» инвертора. В качестве драйвера полумоста использовалась микросхема, ключами служили мощные полевые МОП-транзисторы с изолированным затвором. Индукционный нагрев осуществлялся с частотой входного сигнала –100 кГц и напряжении питания 18 В.

В ходе испытаний были получены следующие результаты: значение времени нагрева до 150°C составило 4 с, до 260°C – 9с, до 300°C – 14 с. При этом температура обмотки индуктора спустя 15 минут непрерывной работы составила 250°C, а температура ферритовой чаши –75°C.

Основным препятствием для использования такого нагревателя в аппаратуре является высокая установившаяся температура обмотки индуктора. С целью увеличения отношения мощности тепловыделения в подложке к мощности тепловыделения в обмотке индуктора P_n/P_{in} было решено выбрать оптимальную частоту тока индуктора и число витков обмотки. Оптимальная частота в грубом приближении не зависит от числа витков и определяется площадью сечения и материалом обмотки [1]. В ходе исследований полагалось, что число витков в 4 раза больше высоты индуктора, взятой в миллиметрах. Анализ моделирования в программе ELCUT показал, что P_n/P_{in} достигает максимума при частоте 300 кГц при которых его значение в 1,13 больше значения, полученного при частоте 100 кГц. При увеличении числа витков в 2 раза P_n/P_{in} увеличился в 2,18 раза. Для подтверждения результатов моделирования в будущем предлагается изготовить и испытать новый, более высокий индуктор с большим количеством витков.

Список литературы

1. Шамов А.Н. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок // Л.: Машиностроение, 1974. 280 с.

С.В. ГАВРИШ, В.В. ЛОГИНОВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, С.В. ПУЧНИНА
ООО «НПП «Мелитта», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе предложен метод тепловизионного исследования температуры нагретого сапфира посредством измерения интенсивности излучения в спектральном диапазоне 7,5 - 14 мкм. Приведены результаты изучения продольного распределения температуры сапфировой оболочки у импульсной ксеноновой лампы сверхвысокого давления.

S.V. GAVRISH, V.V. LOGINOV, D.Y. PUGACHEV, S.V. PUCHNINA

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd, Moscow

RESEARCH OF THE TEMPERATURE OF SAPPHIRE ENVELOPES WHEN DESIGNING PULSED GAS DISCHARGE SOURCES OF RADIATION

A method of thermal imaging research of the temperature of heated sapphire by measuring the radiation intensity in the spectral range of 7.5-14 μm is proposed. The results of studying the longitudinal temperature distribution of the sapphire envelope of a pulsed xenon ultrahigh-pressure lamp are presented.

В силу своей простоты при исследованиях температурных полей разрядных оболочек $T_{об}$ источников излучения (газоразрядных ламп) широко применяется термодатный способ [1]. Однако при изучении $T_{об}$ на термодат воздействует выходящий из разряда лучистый поток, который поглощается материалом термоэлектродов, и вносит погрешность в результаты измерений. Исключить указанные недостатки позволяют методы пирометрии. В связи с объемным характером излучения полупрозрачных кристаллов сапфира (корунда) необходимо использовать специальные пирометры, работающие за границей пропускания этого материала. Наиболее интересна коротковолновая граница первой колебательной полосы поглощения корунда, где величина и температурная зависимость коэффициента поглощения k_{λ} связаны с ангармонизмом колебаний решетки кристалла сапфира. В этой области k_{λ} сапфира может достигать 10^2-10^3см^{-1} , а его излучательная способность приближается к единице.

В наших экспериментальных исследованиях температурных полей сапфировых оболочек была использована тепловизионная система SDS HotFind-LXT, обеспечивающая измерение в диапазоне температур от -20°C до $+1500^{\circ}\text{C}$, при регистрации теплового излучения корунда в спектральном диапазоне 7,5 - 14 мкм. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты исследований

рабочих температур сапфировой оболочки макета импульсной ксеноновой лампы сверхвысокого давления (СВД).

Основные конструктивные характеристики лампы СВД: межэлектродное расстояние 1,2мм, внутренний диаметр колбы 15мм, давление ксенона в холодном состоянии 15 атм. Лампа работала в горизонтальном положении при постоянном токе $I_d=11,9\text{А}$, напряжении $U_d=15,2\text{В}$, мощности $P_d=175\text{Вт}$ и частоте следования токовых импульсов 1,0 кГц. Температурное распределение по длине разрядной колбы представлено на рис. 1,а. Как видно из полученных данных, температурное поле оболочки у этой лампы кардинально отличается от ранее полученных результатов для кварцевых ламп [1]. В нашем случае температура возрастает от закатодной ($L=0$) к анодной ($L=40$) областям по закону близкому к линейному. При этом температура по диаметру колбы имеет разные значения при работе в горизонтальном положении. В наших экспериментах проведено сравнение температуры верхней и нижней частей колбы по схеме, показанной на рис.1,б. Как видно из приведенных графиков на рис.1,а верхняя часть колбы имеет более высокую температуру (кривая 1), чем нижняя поверхность (кривая 2).

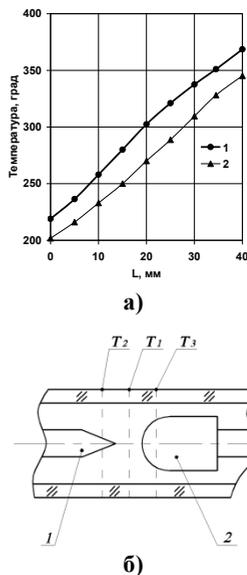


Рис. 1. Тепловые поля в сапфировой оболочке ксеноновой лампы СВД (а) и схема измерений температур по диаметру разрядной колбы (б).

Различие в температуре нижней и верхней поверхности оболочки при работе лампы в горизонтальном положении связано с конвекцией разогретого рабочего газа, которая характерна для разрядных ламп СВД. Предложенная методика исследований температурных полей может применяться для различных типов газоразрядных ламп с сапфировой и кварцевой оболочками.

Список литературы

1. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991.-720с

А.П. ДЕНИСЕНКО, Я.А. КОКОРЕВ, Р.Ф. ИБРАГИМОВ,
Е.В. РЯБЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НАБОРОМ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Проведены измерения выхода импульсного нейтронного генератора. Методом Монте-Карло, с учетом геометрии установки и ослабления в конструкционных материалах, рассчитано количество частиц, которые попадают в детектор, и проведено сравнение с расчетом на основе формулы $1/4\pi R^2$. Представлены результаты проведения эксперимента по облучению нейтронами 14 МэВ от генератора активационных детекторов.

A.P. DENISENKO, Y.A. KOKOREV, R.F. IBRAGIMOV,
E.V. RYABEVA

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

DETERMINING THE OUTPUT OF A PULSED NEUTRON GENERATOR BY A SET OF ACTIVATION DETECTORS

The measurements of the output of a pulsed neutron generator are carried out. The Monte Carlo method, taking into account the installation geometry and attenuation in structural materials, calculated the number of particles that fall into the detector, and compared with the calculation based on the formula $1/4\pi R^2$. The results of an experiment on activation detectors irradiation by 14 MeV neutrons by generator are presented.

В настоящее время одной из важных задач остается определение выхода источников нейтронного излучения. Одним из способов регистрации нейтронов является использование активационных детекторов-образцов различных материалов, которые при взаимодействии с нейтронами определенной, пороговой, энергии, становятся радиоактивными – происходит образование нестабильного изотопа [1]. После активации образец помещается на бета-радиометр или гамма-спектрометр и измеряются характеристики наведенной активности. Полученные характеристики позволяют провести пересчет к выходу нейтронного источника.

В данной работе использовался импульсный нейтронный генератор ИНГ-07Т на основе запаянной нейтронной трубки. Данный генератор основан на реакции $d(t,\alpha)n$ с образованием нейтронов с энергией 14 МэВ.

В качестве активационных детекторов использовались металлы [2]. Детекторы помещались на торец нейтронного генератора и в течение различного времени, от 10 до 30 минут, проводилось облучение быстрыми

нейтронами. Наведенная активности измерялась на гамма-спектрометре на основе особо чистого германия (ОЧГ). Важным фактором при обработке результатов измерений является точная информация о количестве частиц, которые попали в детектор – геометрическом факторе. В данной работе был произведен расчет геометрического фактора, с учетом ослабления в веществе, методом Монте-Карло в программе GEANT4 и так же расчет с помощью отношения $1/4\pi R^2$, который зачастую используется для расчета количества частиц, для геометрий, использованных в эксперименте. Данные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрический фактор

Источник	$4\pi R^2$	Геометрический фактор-расчет по методу Монте-Карло	Отношение $4\pi R^2$ к рассчитанному по методу Монте-Карло
^{60}Co	0,01013	0,01049	0,96568
^{137}Cs	0,01005	0,01064	0,94455
n (14 МэВ)	0,72619	0,24301	2,98831
n (2,5 МэВ)	0,69296	0,24086	2,87702

Как видно из полученной таблицы, при малом расстоянии до источника, геометрический фактор, с учетом ослабления в веществе, в несколько раз отличается от расчета методом Монте-Карло, что подтверждает некорректность использования данной формулы.

В таблице 2 представлены экспериментально определенные значения выхода нейтронов ИНГ-07Т при условии, что практически все нейтроны, образующиеся в генераторе, имеют энергию 14 МэВ.

Таблица 2 – Результаты эксперимента

Детектор	Реакция	Φ экспериментальный, н/с	Φ по показаниям программы, н/с
Cu	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	$(1,45 \pm 0,15) \times 10^8$	$1,5 \times 10^8$
Al	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	$(1,33 \pm 0,13) \times 10^8$	
V	$^{51}\text{V}(n,p)^{51}\text{Ti}$	$(1,12 \pm 0,11) \times 10^8$	

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. Менделеев: ВНИИФТРИ, 2015, 175 с.

В.И. ЗВЕРЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД НЕЙТРОННО-РАДИАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

В работе представлены возможности определения элементного состава горных пород с помощью нейтронно-радиационных методов. Представлены предварительные результаты измерений нескольких образцов горных пород при использовании импульсных нейтронных генераторов, реализующих метод ГИНР (измеряется ответное Гамма Излучение от Нейтронов Рассеяния) и ГИРЗ (измеряется ответное Гамма Излучение Радиационного Захвата). Показана возможность экспресс-анализа кимберлитовых пород с целью обнаружения вкраплений алмазов.

V.I. ZVEREV

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

MEASUREMENT OF ELEMENTAL COMPOSITION OF ROCK SAMPLES VIA NEUTRON RADIATION METHODS

The paper presents the possibilities of determining the elemental composition of rocks using neutron-radiation methods. The preliminary results of measurements of several rock samples using pulsed neutron generators via the GINR method (measuring response gamma radiation produced in neutrons scattering) and GIRZ (measuring response gamma radiation emitted after neutron capture) are presented. The possibility of express analysis of kimberlite rocks with the aim of detecting diamond inclusions is shown as well.

В работе исследованы погрешности определения элементного состава горных пород при их анализе бесконтактными активными нейтронными методами. Ключевое преимущество нейтронных методов анализа перед другими активными методами, например, рентгено-флуоресцентным анализом, базируется на высокой проникающей способности нейтронов вглубь практически любого материала, что позволяет исследовать образец горной породы целиком и получать элементный состав в виде средних значений по объему исследуемого образца.

Определение элементного состава базируется на анализе спектра гамма-излучения, возникающего при взаимодействии нейтронов с ядрами образца. Энергия нейтронов, непосредственно воздействующих на ядра образца, определяет тип нейтронно-радиационного метода: ГИРЗ – регистрируется Гамма Излучение от Радиационного Захвата тепловых нейтронов и ГИНР – регистрируется Гамма Излучение от (быстрых) Нейтронов Рассеяния.

Данная работа представляет результаты при использовании обоих методов. На рис. 1 представлен пример зарегистрированного спектра ГИНР при анализе образца кимберлита и результат его разложения на спектры отдельных элементов.

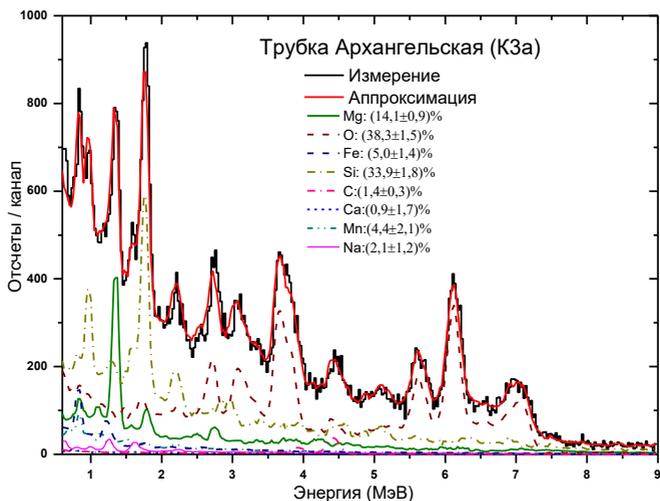


Рис. 1. Пример разложения гамма-спектра кимберлита (трубка Архангельская) на элементные сигнатуры

Результаты показывают, что погрешности определения большинства элементов лежат в диапазоне $[1.6+/-0.6]\%_{\text{абс}}$. При этом погрешность определения углерода в среднем в 4 раза ниже погрешности остальных элементов, что объясняется уникальностью его единственной ответной гамма-линии 4439 кэВ. Данное обстоятельство лежит в основе метода экспресс-анализа кимберлитовых пород с целью обнаружения в них вкрапленных алмазов.

Р.Ф. ИБРАГИМОВ, П.В. ПОНОМАРЕВА, Е.В. РЯБЕВА,
Е.М. ТЮРИН, И.В. УРУПА.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ОТ 0,1 ДО 15 МЭВ ПО ОТКЛИКАМ ДЕТЕКТОРА С АЛМАЗНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

В работе приводятся результаты применения алгоритма модифицированного линейного метода наименьших квадратов для решения задачи восстановления нейтронного спектра в широком энергетическом диапазоне по откликам детектора на базе синтетического монокристалла алмаза. Для реализации данного алгоритма, с помощью Geant4 были получены матрицы расчетных откликов алмазного детектора на моноэнергетическое нейтронное излучение, моделировались моноэнергетические линии нейтронов, полученные в описанных в литературе экспериментах. Восстановлению подвергались отклики, полученные как с помощью моделирования различных тестовых нейтронных спектров радиоизотопных и электрофизических источников, так и в результате проведения эксперимента по регистрации нейтронов со спектром деления. Анализ результатов показал устойчивость получаемых решений по отношению к статистической погрешности в откликах детектора, а также хорошую сходимость решений с исходной тестовой формой нейтронных спектров.

R.F. IBRAGIMOV, P.V. PONOMAREVA, E.V. RYABEVA,
E.M. TYURIN, I.V. URUPA.

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

0.1 TO 15 MEV NEUTRON SPECTRUM UNFOLDING METHOD BY USING DIAMOND RADIATION DETECTOR RESPONSE

The paper presents the results of applying the modified linear least squares algorithm to solve the problem of reconstructing the neutron spectrum in a wide energy range from the responses of a detector based on a synthetic diamond single crystal. To implement this algorithm, the matrix of diamond detector simulated responses to a monoenergetic neutron radiation has been obtained using Geant4. The monoenergetic lines of neutrons obtained in experiments described in the literature were also simulated. As test or validation data there were few responses, that was calculated by Geant4 as diamond detector response to the well known neutron spectra. Also, there was the experimental neutron spectrum unfolding (an spontaneous fission), which show the good convergence with model data. An analysis of the results showed the stability of the obtained solutions with respect to the statistical error in the detector responses.

В данной работе приводятся результаты разработки и создания алгоритма восстановления спектра нейтронов по откликам от алмазного детектора. В основу алгоритма заложена процедура разложения отклика от детектора на

сумму некоторых составляющих, которые представляют собой произведение откликов из заранее полученной матрицы на некоторые весовые коэффициенты. Для осуществления процедуры разложения используется модифицированный линейный метод наименьших квадратов. Модификация представляет собой условие о обязательной неотрицательности возможных решений задачи [1].

Результаты проверки созданного алгоритма на тестовых спектрах и откликах (часть из которых бралась из источников литературы [2,3]) показывают, что энергетический диапазон, в котором может использоваться данный детектор для задач спектрометрии нейтронного излучения составляет значения от 100 кэВ до 20 МэВ (верхний предел определяется возможностями средств Geant4 по моделированию взаимодействия нейтронов с алмазом).

Способность разделять близко лежащие по энергии нейтроны в данном методе определяется функцией разрешения используемого детектора, которая, из результатов экспериментов, имеет зависимость, обратно-пропорциональную корню из величины энергии (разрешающая способность увеличивается с увеличением энергий частиц). Достигнуты значения разрешения 1,5% для нейтронов с энергией в области 14 МэВ.

Анализ результатов работы показывает, что существующая база данных по сечениям взаимодействия нейтронов с углеродом позволяет получить полностью расчетную матрицу откликов, которая будет работоспособна для задачи восстановления экспериментального спектра радионуклидного источника нейтронов со спектром деления, и определения выхода нейтронов данного источника. Минимальный флюенс нейтронного излучения, необходимый для восстановления спектра рассмотренного источника с точностью до 4% составляет значение $\Phi_{\min} = 1,25 \times 10^8$ н/см².

Список литературы

1. Hosseini S. A., Afrakoti I.E. // J. of Radiation Research, 2018. Vol.59, #4, P.436–440.
2. Amosov V.N., Meshaninov S.A., Rodionov N.B. et al.// Diamond & Related Materials 2011. Vol.20, P. 1239-1242.
3. Pillon M., Angelone M., Sergi M.L. and others // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2011. Vol. 640, P. 185–191.

С.В. КУЗНЕЦОВ, В.В. КАДИЛИН, Н.В. БОЙКО, А.В. ШУСТОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

По результатам математического моделирования была разработана конструкция многослойного сцинтилляционного детектора нейтронов (МСДН), реализующего метод спектрометрии нейтронов на основе замедления для стационарного и импульсного источника нейтронов. Проектирование и создание чертежей проводилось в программе SolidWorks. Согласно разработанной конструкции собран макет для проведения экспериментальных исследований характеристик многослойного сцинтилляционного детектора нейтронов.

S.V. KUZNETSOV, V.V. KADILIN, N.V. BOYKO, A.V. SHUSTOV

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

DESIGN FEATURES OF A MULTI-LAYER SCINTILLATION NEUTRON DETECTOR

Based on the results of mathematical modeling, the design of a multi-layer scintillation neutron detector (MSDN) was developed, which implements a method of neutron spectrometry based on deceleration for a stationary and pulsed neutron source. Design and creation of drawings was carried out in the SolidWorks program. According to the developed design, a mock-up was assembled for experimental studies of the characteristics of a multi-layer scintillation neutron detector.

На основании расчетов характеристик МСДН и экспериментальных исследований свойств отдельных регистрирующих модулей была разработана конструкция, содержащая 12 регистрирующих нейтроны модулей и 13 модулей замедления нейтронов из полиэтилена.

Общий вид конструкции МСДН показан на рисунке 1. Конструкция МСДН внешне защищена металлическим корпусом толщиной 2 мм, который покрывает все стороны, кроме передней и крепится винтами к металлическому основанию толщиной 8 мм.

Защита МСДН от рассеянного излучения состоит из блоков борированного полиэтилена толщиной 80мм, которые находятся под внешним корпусом и крепятся винтами к внутреннему металлическому корпусу.

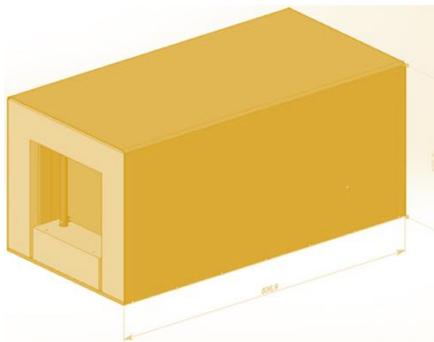


Рис. 1. Вид МСДН в сборе с нанесенными размерами 837 мм по длине и 377 мм по высоте

Внутренний металлический корпус также закрывает конструкцию со всех сторон, кроме передней, и крепится к основанию. Толщина боковых стенок корпуса 10 мм, а верхней 5 мм.

Регистрирующие нейтроны модули и модули замедления нейтронов закреплены на четыре шпильки диаметром 8 мм, протянутые через предусмотренные в модулях отверстия. Шпильки, необходимые для удобства замены детектирующий модулей и модулей замедления, закреплены на четырех металлических стойках, которые зафиксированы в основании и внутреннем корпусе.

Согласно разработанной конструкции собран макет с модулями, содержащими сцинтилляционные детекторы (рис. 2).



Рис. 2. Регистрирующий нейтронный модуль и собранный макет конструкции МСДН

И.М. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ, А.С. ПОЛИВИН
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА ПЕННИНГА В МАЛОГАБАРИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ИОНОВ

В работе представлены результаты исследования зависимостей разрядного и вытягиваемого токов от давления газа в малогабаритных ионных источниках Пеннинга в условиях импульсного режима питания. Исследовано влияние амплитуды напряжения на аноде ионного источника, частоты следования импульсов, их длительности на амплитудно-временные характеристики разряда Пеннинга. Выявлены режимы работы ионных источников и соответствующие диапазоны давлений газа, при которых реализуются стабильные режимы горения разряда.

I.M. MAMEDOV, S.P. MASLENNIKOV, A.S. POLIVIN

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

EXPERIMENTAL STUDY OF PENNING DISCHARGE MODES IN MINIATURE PULSED ION SOURCES

The paper presents the study results of the dependence of the discharge and extracted currents on pressure in miniature Penning ion sources under pulsed power supply conditions. We studied the effect of voltage amplitude at the ion source anode, pulse repetition rate, and pulse duration on amplitude-time characteristics of discharge. The operation regimes of the ion sources and appropriate gas pressure ranges in which stable modes of Penning discharge are realized have been determined.

В работе приводятся результаты исследований стартовых режимов зажигания и амплитудно-временных характеристик малогабаритных ионных источников в условиях импульсно-периодического питания. В качестве плазменного источника в опытных макетах ионных источников использован разряд Пеннинга, зажигаемый во внешнем магнитном поле между цилиндрическим анодом и двумя холодными дисковыми катодами.

Экспериментальный стенд для исследований режимов работы ионных источников оснащен системой датчиков для измерений импульсных напряжений на аноде, разрядного тока и тока заряженных частиц на вытягивающем электроде [1, 2]. В системе откачки и напуска газа стенда реализованы условия для непрерывного контроля и регулировки давления в разрядной ячейке Пеннинга. Система управления стенда позволяет в режиме реального времени регулировать анодное напряжение, регистрировать разрядный и вытягиваемый токи, управлять режимами работы геттеров и

измерять давление газа, определять параметры амплитудно-временные характеристики разряда.

Импульсные твердотельные источники питания стенда построены с использованием составных коммутаторов на основе полевых транзисторов [3] с одноконтурной и двухконтурной схемами выходных каскадов. Амплитуда импульсов анодного напряжения регулировалась от 1,0 до 4,0 кВ, частота следования импульсов изменялась от 0,5 до 10 кГц, диапазон регулировки длительностей импульсов: 30 – 100 мкс. Цикл измерений амплитудных и временных параметров тока разряда и вытягиваемого тока ионов был проведен в диапазоне давлений газа 0,1 – 10 мТорр.

Полученные результаты продемонстрировали, что при импульсно-периодическом питании в разряде Пеннинга устанавливаются равновесные условия между наработкой разрядной плазмы (за время импульса напряжения) и процессами ее распада (в паузе между импульсами). Для достижения равновесных условий горения разряда требуется последовательность из более чем $\sim 10^3$ импульсов напряжения. Минимальная частота следования импульсов, при которой было зафиксировано устойчивое зажигание разряда равна ~ 1 кГц. Повышение частоты следования импульсов (до 10 кГц) сопровождалось снижением времени задержки зажигания разряда, минимальные значения которого составили около 3 мкс.

Экспериментальные исследования показали определяющее влияние давления газа на режим горения разряда и его амплитудно-временные характеристики. Нижняя граница диапазона давлений, в котором происходило зажигание разряда, составила ~ 1 мТорр. При давлениях более ~ 3 мТорр для разряда создавались условия для его стабильного зажигания (с повторяемыми амплитудными и временными токовыми параметрами). При давлениях более ~ 10 мТорр на вершинах импульсов разрядного тока формировались характерные высокочастотные осцилляции, определяемые возбуждением неустойчивостей горения разряда.

Список литературы

1. Мамедов Н.В., Масленников С.П. и др. //ЖТФ, 2019, вып.9, С.1367-1374.
2. Рачков Р.С., Масленников С.П. и др. //Атомная энергия, 2019, Т. 127, №1 (7), С.39-43
3. Масленников С.П. // Радиотехника и электроника, 2018, Т. 63, №1, С.80-84

Н.В. МАМЕДОВ^{1,2}, С.П. МАСЛЕННИКОВ^{1,2},
А.А. СОЛОДОВНИКОВ¹, Д.И. ЮРКОВ^{1,2}

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО ПЕННИНГОВСКОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА В ПЕРЕХОДНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЯ

В статье представлены результаты экспериментов по исследованию зависимостей разрядных и вытягиваемых токов от давления для импульсного источника ионов Пеннинга. Представлены результаты сравнительного анализа амплитудно-временных и вольт-амперных характеристик ионного источника для различных амплитуд анодного напряжения, частоты повторения импульсов, длительностей импульсов, структуры и величины магнитного поля.

N.V. MAMEDOV^{1,2}, S.P. MASLENNIKOV^{1,2},
A.A. SOLODOVNIKOV¹, D.I. YURKOV^{1,2}

¹*All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov
(FSUE VNIIA), Moscow, Russia*

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

OPERATION FEATURES OF THE PULSE PENNING ION SOURCE IN THE TRANSITION PRESSURE RANGE

The paper presents results of experiments studying the dependence of discharge and extracted currents on the pressure of pulsed penning ion source. A comparative analysis of the amplitude-time and voltage-current characteristics of the ion source for the various anode voltage amplitudes, pulse repetition rates, pulse durations, magnitudes (and configurations) of the magnetic field is presented.

Разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях (разряд Пеннинга) широко применяется в различных областях науки и техники. Одним из перспективных направлений использования разряда Пеннинга является создание на его основе ионных источников для малогабаритных линейных ускорителей.

В зависимости от напряжения на аноде (в режимах питания от источников постоянного тока), величины магнитного поля и давления рабочего газа выделяются различные режимы (моды) горения разряда [1].

Исследования показали, что от режима горения разряда зависят распределение потенциала внутри разрядной ячейки, концентрации заряженных частиц, скорость развития разрядных процессов и, как следствие, плотность

формируемого ионного потока, а также эффективность извлечения ионов. Для обеспечения условий стабильного и управляемого режима работы ионных источников в аппаратуре, предполагающей плавную регулировку и стабилизацию параметров ионного потока, требуется, чтобы зависимость тока разряда (и, соответственно, извлекаемого ионного тока) от давления была близка к линейному виду. Особенно нежелательными являются режимы горения разряда, отличающиеся резким экспоненциальным ростом тока в разряде при увеличении давления газа.

Для импульсных ионных источников, кроме того, значимым критерием стабильности работы становится генерация импульсов извлекаемого тока ионов прямоугольной формы, обладающих передними и задними фронтами малой длительности (менее 1 мкс). Для целого ряда практических применений требуется, чтобы при регулировке давления газа в заданном рабочем диапазоне сохранялась форма импульса ионного тока на выходе источника.

В данной работе проведен цикл экспериментов по исследованию зависимости разрядного и вытягиваемого токов от давления в ионных источниках Пеннинга в условиях их импульсного питания [2]. Выполнен сравнительный анализ амплитудно-временных и вольтамперных характеристик ионного источника Пеннинга при различных режимах работы системы питания (амплитуда напряжения на аноде разрядной ячейки, частота следования импульсов, их длительности), а также структуры и величины индукции магнитного поля в ионном источнике.

В результате проведенных исследований определены рабочие диапазоны параметров системы импульсного питания, соответствующие диапазоны давлений, в которых обеспечиваются условия для реализации стабильных мод горения разряда Пеннинга и эффективного извлечения ионных потоков. Выявлены характерные особенности режимов горения разряда в переходном диапазоне давлений $\sim 0,5\text{--}2$ мТорр, проявляющихся в формировании высокочастотных осцилляций на осциллограммах разрядного и вытягиваемого токов ионного источника.

Список литературы

1. W. Schuurman // Physica, 1967, v.36, p. 136-160.
2. Мамедов Н.В., Масленников С.П. и др. // ЖТФ, 2019, вып.9, стр. 1367-1374.

И.С. МАСЛЕННИКОВА, Г.И. ЗЕБРЕВ

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 отечественного производства на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц космического пространства. Выполнена оценка пороговых значений линейной передачи энергии возникновения одиночных радиационных эффектов и верхние границы доверительных интервалов.

I.S. MASLENNIKOVA, G.I. ZEBREV

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

STABILITY TESTS OF THE INTEGRATED CIRCUITS TO THE EXPOSURE TO HEAVY IONS

The paper presents the results of stability tests types of analog-to-digital converters of national production 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 and upper bounds of confidence intervals are estimated.

Космические корабли в полете подвергаются воздействию большого количества факторов космического пространства: потоков электронов и ионов высокой энергии, плазмы, солнечного электромагнитного излучения и т.д. В результате такого воздействия в материалах и элементах оборудования космических кораблей протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров. В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической среды, происходящие изменения в свойствах материалов и элементов оборудования могут происходить с разной периодичностью, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для бортовых систем летательных аппаратов.

Согласно экспериментальным данным и теоретическим оценкам, более половины отказов в работе оборудования космических аппаратов обусловлено неблагоприятным влиянием факторов космического пространства. При этом возникновение сбоев и отказов связано преимущественно с теми или иными радиационными эффектами, вызванными воздействием электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц на материалы оборудования.

Воздействие космической радиации может приводить к постепенному и быстрому ухудшению свойств материалов бортовых систем и их характеристик. Ухудшение свойств материалов компонентов бортовой аппаратуры приводит как к отказам в работе летательных аппаратов по истечении некоторого периода эксплуатации, так и к возникновению внезапных отказов, сопровождающих воздействие космической радиации.

Поэтому обеспечение надежной эксплуатации космических аппаратов в космосе тесно связано с решением большого количества научно-технических проблем, связанных с воздействием космической радиации. Основные факторы внешней обстановки летательных аппаратов хорошо известны. Это глубокий вакуум, невесомость, мощные потоки теплового, ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца. А также множество частиц: высокоэнергичные электроны, ядра химических элементов, частицы солнечных космических лучей и радиационных поясов Земли, частицы микрометеоритов и космического мусора. Каждый из этих факторов требует особого изучения и подхода при решении возникающих проблем, вследствие воздействия на аппаратуру.

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). 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 см²/мг. Поток ионов выбирался в зависимости от чувствительности объекта испытаний к ОРЭ.

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.

Список литературы

1. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники. 2011. с. 288.

С.П. МОРЕВ, А.Н. ДАРМАЕВ, К.В. КУЗЬМИЧ,
Э.К. МУРАВЬЕВ, В.М. САБЛИН

АО Научно-производственное предприятие «Торий», г. Москва, Россия

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУШКИ С КРУПНОСТРУКТУРНЫМИ ИГОЛЬЧАТЫМИ АВТОЭМИССИОННЫМИ ЯЧЕЙКАМИ: РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Обсуждается возможность использования крупноструктурных игольчатых автоэмиссионных структур для электронных пушек электровакуумных приборов. Представлены результаты теоретического и экспериментального анализа.

S.P. MOREV, A.N. DARMAEV, K.V. KUZMICH,
E.K. MURAVIEV, V.M. SABLIN

Research and Production Enterprise "TORIY", Moscow, Russia

ELECTRON GUNS WITH LARGE-STRUCTURE NEEDLE-SHAPED AUTOEMISSION CELLS: CALCULATIONS AND EXPERIMENTS

The possibility of using large-structure needle-like auto-emission structures for electron guns of electro-vacuum devices is discussed. The results of theoretical and experimental analysis are presented.

Из-за возможности получения тока с катодных матриц, работающих на полевой эмиссии, игольчатые или лезвийные автоэммиттеры из различных материалов продолжают оставаться перспективными объектами для изготовления катодов различных электровакуумных устройств.

В докладе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований крупноструктурных игольчатых автоэмиссионных структур, с устойчивой эмиссией электронного потока с катодов из различных материалов. Максимальные значения достигнутых катодных токов в непрерывном режиме работы при техническом вакууме не хуже 10^{-7} Торр составили 1,5 мА при напряжении 2500 В для стеклоуглерода, 4,5 мА при напряжении 4300 В для молибдена и 5,0 мА при напряжении 6000 В для вольфрама. Токи на сетку составляли от 1 до 3% катодного тока.

Экспериментальные исследования проводились на макете электронной пушки, в которой могло размещаться от одной до четырех одиночных ячеек с автоэммиттерами из разных материалов (рис.1).

Показано, что токи с отдельных автоэммиттеров суммируются, и ожидаемая величина тока с катодной матрицей из семи автоэммиттеров может составить не

менее 10 мА, а с катодной матрицей из девятнадцати автоэммитеров – не менее 25 мА.

Показано, что в непрерывном режиме работы при вакууме $4 \cdot 10^{-8}$ Торр в течение более чем 10 часов при токе 0,35 мА и напряжении катод-сетка 4600 В деградация тока вольфрамового катода не превышала 10 мкА/час (рис.2).

Показано, что при кратковременной (~2-3 минуты) работе в непрерывном режиме и усредненной плотности тока с острия вольфрамового автоэммитера, не превышающей, по крайней мере, $1000-3000 \text{ A/cm}^2$, изменения радиуса кривизны острия не происходит.

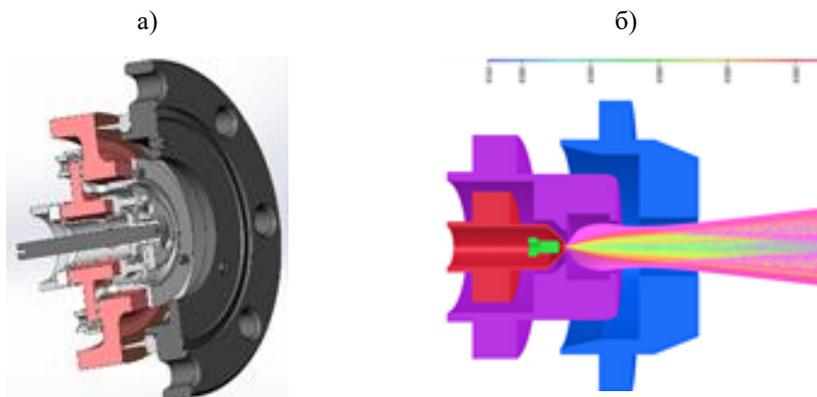


Рис. 1. Макет электронной пушки с автоэмиссионным катодом (а) и формирование пучка в электронной пушке (б)

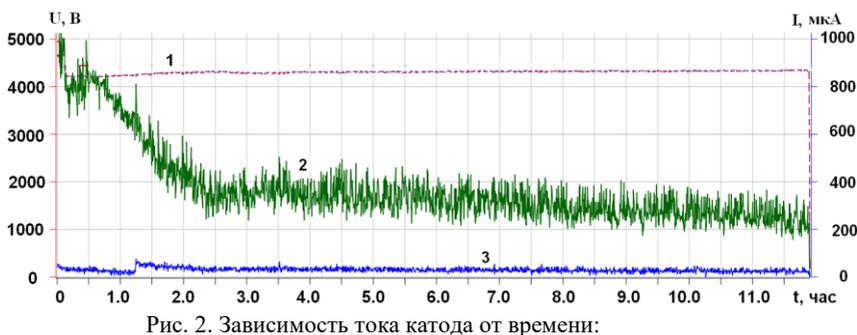


Рис. 2. Зависимость тока катода от времени:

1 – напряжение катод-сетка, 2 – ток катода, 3 – ток сетки.

Г.В. ПОЛЁТОВ

*АО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации»,
Москва, Россия*

ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ БЕЗ ОХРАННОГО ЭЛЕКТРОДА

Рассмотрена вольтамперная характеристика токовой ионизационной камеры в случае наличия токов утечки между электродами. Предложена поправка, уточняющая ранее известное выражение для вольтамперной характеристики такой ионизационной камеры.

G.V. POLETOV

*Research and Development Institute for Technical Physics and Automation, Joint-Stock
Company, Moscow, Russia*

THE SHAPE OF ION CHAMBER SATURATION CURVE IN THE ABSENSE OF GUARD ELECTRODE

The saturation curve of the current ionization chamber in the case of the presence of leakage currents between the electrodes is considered. A correction is proposed that refines the previously known expression for the saturation curve of such an ionization chamber.

Форма вольтамперной характеристики идеальной ионизационной камеры с плоскопараллельными электродами известна из работы Мие [1]. Для идеальной плоскопараллельной ионизационной камеры без токов утечки уравнение вольтамперной характеристики для области насыщения выглядит следующим образом

$$\frac{1}{I(V)} = \frac{1}{I_0} + \frac{C}{V^2}, \quad (1)$$

где $I(V)$ – ионизационный ток;

I_0 – ток насыщения;

C – размерный параметр;

V – напряжение между электродами ионизационной камеры.

В случае отсутствия охранного электрода или в случае невозможности полностью исключить пути тока утечки внутри ионизационной камеры, форма вольтамперной характеристики должна учитывать это явление. Простейшая поправка учитывает эквивалентное сопротивление утечки введением омического члена в (1)

$$\bar{I}(V) = \frac{1}{\frac{1}{I_0} + \frac{c}{V^2}} + \frac{V}{R}, \quad (2)$$

где R – величина эквивалентного сопротивления утечки.

Первое слагаемое в правой части выражения (2) представляет собой ионизационный ток, второе – ток утечки через эквивалентное сопротивление. Результаты экспериментальной проверки применимости соотношения (2) для описания формы кривой вольтамперной характеристики в случае равномерного облучения фотонами разрядного промежутка плоскопараллельной ионизационной камеры приведены на рис. 1.

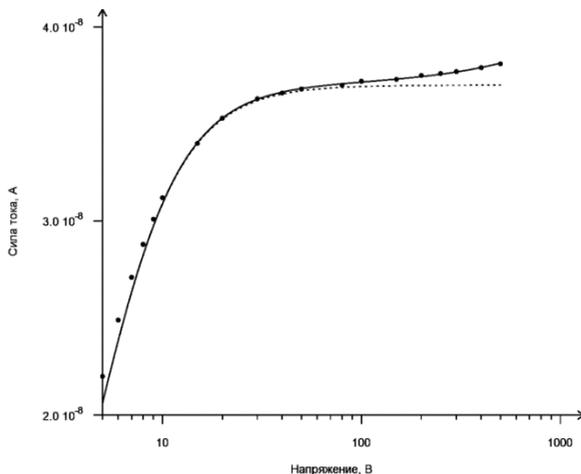


Рис. 1. Вольтамперная характеристика плоскопараллельной ионизационной камеры [2]. Точками отмечены результаты измерений, сплошной кривой результаты интерполяции методом наименьших квадратов зависимости (2), пунктирной линией показан ионизационный ток

Экстраполяция на рис. 1 осуществлялась с помощью нелинейного метода наименьших квадратов. Данная процедура позволяет по экспериментальным данным установить величину эквивалентного сопротивления утечки плоскопараллельной ионизационной камеры.

Список литературы

1. Mie G. The electric current in ionized air in a plane parallel condenser // Ann. Phys. - 1904. - №13. - С. 857-889.

2. Полётов Г.В. // Сб. статей ВАНТ (Вопросы Атомной Науки и Техники) серии «Техническая физика и автоматизация». М.: АО «НИИТФА», 2019.

П.В. ПОНОМАРЕВА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА,
Е.М. ТЮРИН, И.В. УРУПА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ТИХОНОВА В ЗАДАЧЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ ДЛЯ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

В работе представлен способ восстановления энергетического спектра быстрых нейтронов по показаниям монокристаллического алмазного детектора. Представленный алгоритм основан на методе регуляризации Тихонова с использованием метода наименьших квадратов в качестве метода минимизации. В качестве инструмента моделирования матрицы расчетных откликов алмазного детектора на моноэнергетическое нейтронное излучение использован инструментальный Geant4. Алгоритм восстановления энергетического спектра быстрых нейтронов реализован на языке программирования Python 3. Проведена оценка характеристик сходимости восстановленных спектров с тестовыми.

P. V. PONOMAREVA, R. F. IBRAGIMOV, E. V. RYABEVA,
E. M. TYURIN, I. V. URUPA

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

TIKHONOV REGULARISATION METHOD FOR NEUTRON SPECTRA UNFOLDING BY DIAMOND DETECTOR RESPONSE

The work presents a method for reconstructing the energy spectrum of fast neutrons from the readings of a single-crystal diamond detector. The presented algorithm is based on the Tikhonov regularization method using the least squares method as a minimization method. The Geant4 toolkit was used as a modeling tool for the matrix of calculated responses of a diamond detector to monoenergetic neutron radiation. The algorithm for reconstructing the energy spectrum of fast neutrons is implemented by the Python 3 programming language. The convergence characteristics of the reconstructed spectra with the test ones are estimated.

В представленной работе приводится алгоритм восстановления энергетического спектра быстрых нейтронов по показаниям монокристаллического алмазного детектора. Разработанный алгоритм базируется на методе регуляризации Тихонова [1], позволяющего находить приближенные решения некорректно поставленных задач вида $AF = N$, где A - матрица расчетных откликов алмазного детектора на моноэнергетическое нейтронное излучение, F - вектор с искомыми флюенсами нейтронов определенных энергий, N - столбец отклика алмазного детектора. Параметр регуляризации, используемый в данном алгоритме восстановления, находится посредством минимизации функционала определенного вида методом

наименьших квадратов с условием обязательной неотрицательности решения [2].

Погрешность полученных значений флюенсов нейтронов в представленном алгоритме, как и погрешность значения подбираемого параметра регуляризации, определяется приборной погрешностью алмазного детектора, которая выражается в виде нестабильности скорости счета в пределах 5 %.

Для оценки качества восстановления спектров использованы следующие критерии:

- Отношение интегрального тестового к интегральному восстановленному флюенсу нейтронов (для тестовых спектров, имитирующих спектры реальных источников, значение варьируется от 1 до 1,006).
- Смещение положения максимумов тестового спектра относительно положения максимумов восстановленного спектра, составившее значение не более 0,01.

Восстановление нейтронного спектра с помощью разработанного алгоритма имеет некоторую погрешность, которую предстоит определить более точно в дальнейших работах по данной теме. Данная погрешность определяется такими факторами как: набор статистики, наличие сопутствующего излучения, неточность физической модели (неточность значений сечений взаимодействий нейтронов с углеродом, которые берутся из базы данных ENDF, краевые эффекты, шумы электроники, зависимость разрешения алмазного детектора от поглощенной энергии, особенности формирования статистической погрешности в модели).

Список литературы

1. Сумин М.И. Метод регуляризации А.Н. Тихонова для решения оптимизационных задач // Нижний Новгород, 2016, С.35
2. Худсон Д. Статистика для физиков // М.: «Мир», 1970.с. 295.

М.В. ПРОКУРОНОВ, В.Д. СЕВАСТЬЯНОВ, О.И. ФОМИН,
Р.М. ШИБАЕВ, А.В ЯНУШЕВИЧ

*ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и
радиотехнических измерений*

ПОСТРОЕНИЕ 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 на основе координатно-чувствительных детекторов (КЧД) модульного типа, т.е. когда КЧД является матрицей отдельных детекторов (модулей). Реальная возможность разработки таких КЧД стало возможна в связи с развитием цифровых электронных систем. В таком КЧД регистрация импульсов модульных детекторов и их цифровая обработка может производиться одновременно, параллельно и независимо друг от друга. А такое построение КЧД и позволяет рассматривать расширение областей применения подобных интроскопов.

М.В. PROKURONOV, V.D. SEVASTYANOV, O.I. FOMIN,
R.M. SHIBAEV, A.V. YANUSHEVICH

*Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Physico-Technical
and Radio Engineering Measurements*

CONSTRUCTION OF INTROSCOPES WITH CODED APERTURE FOR REGISTRATION OF IMAGE OF MIXED FAST NEUTRON AND GAMMA RADIATION SOURCES

The possibility of constructing introsopes with a coded aperture for recording images of sources of mixed fast neutron and gamma radiation based on coordinate-sensitive detectors (PSD) of a modular type, i.e. when PSD is a matrix of individual detectors (modules). The real possibility of developing such a PSD became possible in connection with the development of digital electronic systems. In such a PSD, the registration of pulses of modular detectors and their digital processing can be carried out simultaneously, in parallel and independently of each other. And such a construction of PSD allows us to consider the expansion of the scope of such introsopes

Достаточно актуальной проблемой в области ядерно-физических исследований является измерение спектральных и временных характеристик смешанных γ -нейтронных полей, а также определение положения источников ионизирующего излучения на поверхности и в пространстве. Для такой регистрации следует проанализировать возможность использования интроскопа с кодированной апертурой, который измеряет направление прихода γ -кванта и нейтрона, энергию, момент времени регистрации. А это наиболее полная

информация о поле ионизирующего излучения. Такой интроскоп состоит из коллиматора с кодированной апертурой, защиты от фонового излучения и КЧД. В коллиматоре имеются отверстия, определенным образом расположенные, каждое 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 источников. Конструкция коллиматора определяет тип регистрируемых частиц, величину поля зрения и угловое разрешение, а также оптимальное, с минимальными искажениями построение теневого изображения. КЧД определяет чувствительность интроскопа, спектрально-временные характеристики и возможность идентификации типа регистрируемых частиц. Для раздельной регистрации нейтронного и γ -изображений могут использоваться КЧД, которые обладают избирательной регистрацией электронов и протонов. Такие КЧД могут быть разработаны на основе сцинтилляционных детекторов с цифровой идентификацией частиц по форме импульса и черенковских детекторов. Интроскопы могут обладать высоким временным разрешением до 1нс, и позволяют регистрировать изображение импульсных процессов. В КЧД наблюдаются искажения теневого нейтронного и γ -изображения при краевых эффектах взаимодействия излучения с коллиматором и модулями КЧД и при многократном рассеянии излучения в модулях КЧД. Искажения можно уменьшить, если применять КЧД, в которых происходят процессы поглощения излучения. Так для регистрации изображения источников тепловых нейтронов используется интроскоп, в котором тепловые нейтроны поглощаются с образованием альфа-частиц. Быстрые нейтроны также могут поглощаться в реакциях с образованием альфа-частиц. Такими свойствами обладают алмазные детекторы, они применяются в экспериментах по термоядерному синтезу. На основе таких алмазных КЧД можно исследовать возможность построения интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения нейтронных источников с высокой плотностью потока быстрых нейтронов. Также активно используются и развиваются математические методы по устранению искажений в восстановленном изображении.

Д.Ю. ПУГАЧЕВ
ООО «НПП «Мелитта», Москва, Россия

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА РАЗРЯДНЫЕ САПФИРОВЫЕ ОБОЛОЧКИ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены методика и результаты исследований сапфировых оболочек газоразрядных источников излучения на устойчивость к воздействию предельных электрических нагрузок в зависимости от количества блоков в монокристалле. Выявлена корреляция полученных результатов с зависимостью механической прочности сапфировой трубы от количества блоков.

D.Y. PUGACHEV,

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd, Moscow

ELECTRIC LOAD LIMITS ON DISCHARGE SAPPHIRE ENVELOPES OF PULSED SOURCES OF RADIATION

The methodology and results of studies of sapphire envelopes of gas discharge radiation sources on resistance to ultimate electric loads depending on the number of blocks in a single crystal are considered. The correlation of the obtained results with the dependence of the mechanical strength of the sapphire pipe on the number of blocks is revealed.

При конструировании газоразрядных источников излучения у разработчиков в качестве характеристики, определяющей надежность изделия, принято считать предельную электрическую мощность, при которой происходит разрушение оболочки разрядной трубки P_{np} . Применение новых материалов, в частности, сапфира ставит остро задачу изучения предельной электрической нагрузки на оболочку в зависимости от структурного совершенства (блочности) этого монокристалла.

Испытания на воздействие предельных электрических нагрузок нами проводились на макетных образцах газоразрядных ламп с размерами сапфировой оболочки разрядной трубки: внутренний и наружный диаметры 6,7^{+0,25} и 9,6^{-0,25} мм, соответственно, при длине плазменного канала 60 мм. После зажигания разряда в лампе посредством мощного источника постоянного тока МИТ-47 фиксировался начальный ток $I_n=6$ А и осуществлялся прогрев оболочки в течение 5 минут. Далее через каждые 5 минут ток увеличивали на 1А вплоть до разрушения лампы или до достижения предельной величины тока, допускаемого испытательным оборудованием. При каждом значении тока нами производился замер напряжения на лампе, и рассчитывалась электрическая мощность, вкладываемая в разряд.

Для малоблочных труб была получена зависимость предельной разрушающей электрической мощности от числа блоков (рис. 1). Нами установлено, что с уменьшением числа блоков предельная разрушающая нагрузка возрастает. При этом ход кривой $P_{пр.}$ коррелирует с зависимостью изменения механической прочности от количества блоков (рис. 2).

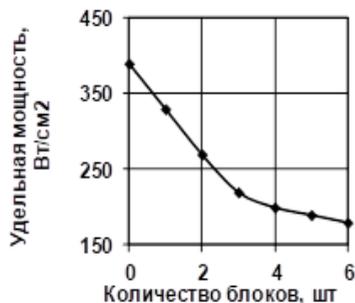


Рис. 1. Зависимость предельной электрической мощности на лампе от количества блоков

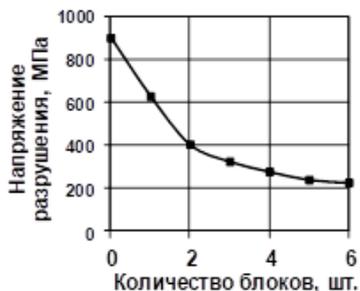


Рис. 2. Зависимость предельного напряжения разрушения от количества блоков

Сравнение этих зависимостей правомочно, так как в обоих случаях использовались сапфировые трубы с толщиной стенки 1,4 мм. Учитывая полученный результат, при серийном изготовлении сапфировых оболочек можно использовать методику испытаний на механическую прочность выращенных труб [1] и исключить дорогостоящие исследования в лампах.

При изучении безблочных труб их не удалось разрушить при электрических нагрузках до 390 Вт/см², что было выше полученных результатов $P_{пр.} = 350$ Вт/см² в [1] для трубы, изготовленной механической обработкой (сверление, шлифовка, полировка) из були Вернейля. Эксперимент не удалось провести до полного разрушения ламп в силу ограниченных возможностей испытательного оборудования. Полученный результат позволяет сделать важное заключение о возможности создания газоразрядных источников излучения с компактным телом свечения большой мощности.

Список литературы

1. Gavrish S. V. The Effect of Structural Flaws on the Properties of the Sapphire Shell of a Discharge Radiation Source // Rus.j. of nondestructive testing. 2010. V. 46, 8, P. 603.

А.М. СКОТНИКОВ, С.В. КОЛЕСНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ARDUINO ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СБОРА ДАННЫХ ОТ МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Рассмотрены возможные варианты реализации системы подсчета импульсов от регистрирующих слоев многослойного детектора нейтронов с 10 счетными каналами. Выработан оптимальный вариант, позволяющий производить подсчет импульсов с загрузкой до 10^4 импульсов в секунду по каждому регистрирующему каналу.

A.M. SKOTNIKOV, S.V. KOLESNIKOV

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

APPLICATION OF MICROCONTROLLER ARDUINO FOR SOLVING DATA COLLECTION FROM MULTI-LAYER NEUTRON DETECTOR

Possible options for implementing the system for counting pulses from the recording layers of a multilayer neutron detector with 10 counting channels are considered. An optimal option has been developed that allows counting pulses with loading up to 10^4 pulses per second for each recording channel.

Одним из инструментов, используемом при контроле несанкционированного перемещения делящихся материалов и радиоактивных веществ является многослойный детектор нейтронов (МДН). МДН позволяет производить не только интегральный счет нейтронной компоненты, но и спектральный анализ нейтронного поля, создаваемого контролируруемыми объектами.

Детектор был разработан в начале 2000 годов и имеет 10 счетных каналов. На сегодняшний день имеющаяся в нем система сбора данных (ССД) вышла из строя и для ее замены потребовалось полностью реализовать новую ССД с учетом имеющихся современных технологий. ССД должна обеспечивать подсчет количества зарегистрированных импульсов не ниже 10^4 имп/сек одновременно по каждому каналу, тип входного сигнала TTL. Сохранение накопленных данных должно происходить на персональный компьютер по интерфейсу связи USB.

Первоначально рассматривались варианты построения ССД на основе ПЛИС или разработка собственной платы на основе бытовых микроконтроллеров (AVR, PIC). В результате было принято решение использовать решение на основе микроконтроллера из семейства Arduino, в частности Arduino UNO или Arduino MEGA.

В конечном варианте за основу был взят микроконтроллер Arduino UNO. Согласно спецификации микроконтроллеров AVR, помимо внешних прерываний по конкретным пинам, они имеют прерывание по порту целиком. Основным преимуществом в такой схеме является то, что прерывание происходит при любом изменении значения пинов. Получив прерывание, можно прочитать значение всего порта – определить на каких пинах высокий уровень (пришел сигнал), а на каких низкий (нет сигнала). Далее, имея динамическую бинарную маску, можно определить на какой из пинов пришел импульс, вызвавший прерывание.

В итоге алгоритм работы ССД получился следующий: по приходу импульса на один из пинов конкретного порта происходит прерывание, после этого осуществляется чтение значений пинов порта и по бинарным маскам происходит определение пина на который пришел импульс. После определения с какого из каналов детектора пришел импульс происходит увеличение на единицу соответствующего счетчика в микропрограмме микроконтроллера и изменение бинарной маски в соответствии с состоянием порта.

Определение предельной загрузки ССД определялась путем подачи сигналов разной частоты от генератора сигналов с контролем результатов измерения на цифровом осциллографе. Измерения проводились как при загрузке одного канала, так и при одновременной загрузке всех измерительных каналов ССД.

В результате было определено, что отсутствует зависимость максимальной загрузки от количества загруженных каналов. Максимальная загрузка, при которой расхождение с осциллографом не более 10%, составила $5 \cdot 10^4$ импульсов в секунду. Работа МДН была полностью восстановлена.

Список литературы

1. Кадилин В.В., Колесников С.В., Самосадный В.Т. и др. // ПТЭ, 2002, № 3, с. 14—23.
2. ArduinoUno <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno>

И.В. УРУПА, Е.Э. ЛУПАРЬ, А.В. СКОТНИКОВА, В.В. КАДИЛИН, Е.В.
РЯБЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА EJ-276 ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗДЕЛЕНИЮ СМЕШАННЫХ ГАММА- НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ

В работе представлены результаты калибровки спектрометра на основе пластикового сцинтиллятора EJ-276 по гамма-излучению в области энергий, соответствующих краям Комптона энергий гамма-квантов 0,511-4,4 МэВ. Калибровка проводилась путём наложения модельных спектров откликов от образцовых спектрометрических гамма-источников (GEANT4) на экспериментальные спектры этих же изотопов. Кроме этого, показано, что в случае измерения смешанного гамма-нейтронного спектра калибровку следует проводить отдельно по гамма- и нейтронному излучению.

I.V. URUPA, E.E. LUPAR, A.V. SKOTNIKOVA, V.V. KADILIN, E.V.
RYABEVA

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

CALIBRATION OF THE SPECTROMETER BASED ON THE EJ-276 ORGANIC SCINTHILLATOR FOR PULSE SHAPE DISCRIMINATION EXPERIMENTS

The paper presents the calibration results of a spectrometer based on a plastic scintillator EJ-276 for gamma radiation in the energy region corresponding to the Compton edges of gamma-ray energies of 0.511-4.4 MeV. Calibration was carried out by superimposing model spectra of responses from exemplary spectrometric gamma sources (GEANT4) to experimental spectra of the same isotopes. In addition, it was shown that in the case of measuring the mixed gamma-neutron spectrum, calibration should be carried out separately for gamma and neutron radiation.

В отличие от калибровки сцинтилляционных детекторов на основе неорганических сцинтилляторов, которая проводится по известным положениям центров пиков полного поглощения гамма-излучения, калибровка пластиковых сцинтилляторов осуществляется по краям комптоновского распределения, экспериментальное положение которых неизвестно. В данной работе калибровка проводится путём наложения модельных (GEANT4) спектров энерговыделения от ОСГИ (^{22}Na , ^{207}Bi , ^{134}Cs , ^{137}Cs) на экспериментальные спектры откликов. Энергия комптоновского края вычисляется по формуле:

$$E_{comp} = \frac{2m_e c^2 g^2}{1+2g}, g = \frac{E_\gamma}{m_e c^2}, \text{ где } m_e c^2 = 511 \text{ кэВ, } E_\gamma \text{ — энергия } \gamma\text{-кванта.}$$

Кроме того, в работе проведено измерение смешанного гамма-нейтронного спектра импульсного нейтронного генератора в полиэтиленовой защите с помощью методики разделения сигнала по форме импульса (PSD) и показано, что калибровку спектрометра по нейтронам надо проводить отдельно от калибровки по гамма-квантам в связи с различием световых выходов от протонов и электронов. Также согласно результатам работы [1], калибровка по нейтронам сама по себе нелинейна. Также из вышеуказанного смешанного спектра были определены комптоновские края спектров элементов ^{12}C и ^1H с $E_\gamma = 4,43$ МэВ и 2,2 МэВ соответственно, образовавшихся по реакции (n,γ) при взаимодействии нейтронов с полиэтиленом. Результирующая калибровка PSD спектрометра по гамма-излучению в диапазоне энергий 0,5-4 МэВ представлена на рис. 1.

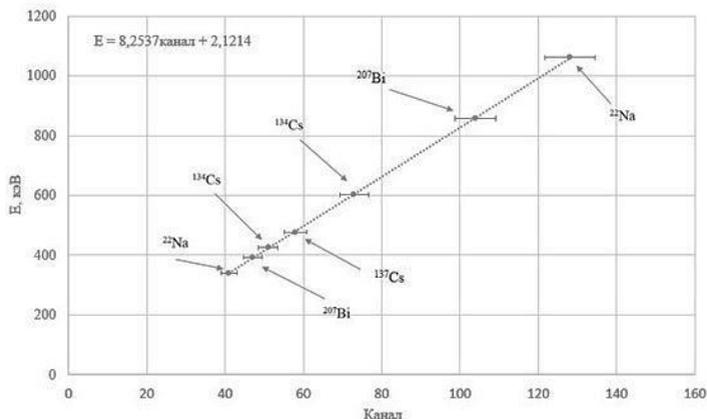


Рис. 1. Калибровка PSD спектрометра по гамма-излучению

В дальнейших экспериментах планируется калибровка спектрометра по моноэнергетическим линиям нейтронного излучения и разработка методики по восстановлению нейтронного спектра по показаниям пластикового сцинтиллятора.

Список литературы

1. C. Payne. Development of EJ-299 plastic scintillator detectors for neutron/gamma discrimination // Dep. of Phys. Fac. of Eng. and Phys. Sciences Univ. of Surrey. 2018. P. 181

И.В. УРУПА, Е.Э. ЛУПАРЬ, В.В. КАДИЛИН, Е.В. РЯБЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕШАННЫХ ГАММА-НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ ДЕТЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

В работе представлен начальный этап разработки установки по спектрометрии быстрых нейтронов с помощью органического сцинтиллятора, результаты и обработка измерений смешанных гамма-нейтронных спектров импульсного нейтронного генератора. Разделение сигналов от гамма- и нейтронного излучений проводилось на дигитайзере CAEN-5730 с помощью методики разделения сигналов по форме импульса (PSD). В качестве детектора использовался пластиковый сцинтиллятор EJ-276.

I.V. URUPA, E.E. LUPAR, V.V. KADILIN, E.V. RYABEVA

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

SEPARATION OF MIXED GAMMA-NEUTRON SPECTRA BY AN ORGANIC SCINTILLATOR DETECTOR

The paper presents the initial stage of development of a facility for fast neutron spectrometry with an organic scintillator - the results and processing of measurements of mixed gamma-neutron spectra of a pulsed neutron generator. Separation of signals from gamma and neutron radiation was carried out on a digitizer using the technology of signal discrimination by pulse shape (Pulse Shape Discrimination, PSD).

Проблема разделения смешанных гамма-нейтронных спектров в настоящее время является актуальной задачей для изучения свойств различных источников нейтронов, в том числе, импульсных [1,2].

В работе измерены PSD-спектры импульсного нейтронного генератора с энергией 14 МэВ с замедлителем нейтронов и без, а также проведены измерения PSD-спектров источника ^{252}Cf . Таким образом, в исследовании отражены измерения для двух основных типов источников нейтронов – моноэнергетического источника и источника нейтронов деления. Для калибровки спектрометра использовались образцовые спектрометрические гамма-источники ^{60}Co и ^{137}Cs . Калибровка спектрометра на основе органического сцинтиллятора является отдельной задачей ввиду отсутствия пиков полного поглощения на энергетическом спектре, а потому калибровка происходит по комптоновским краям и с помощью модельного спектра отклика.

В результате работы путём оптимального выбора настроек дигитайзера (порогов, триггеров, входных ворот для «медленной» и «быстрой» компонент и т.д.) удалось успешно провести разделение смешанного сигнала генератора

нейтронов на сигналы, рожденные гамма- и нейтронным излучением. Разделенный аппаратный спектр представлен на рис.1. Также удалось установить соотношение интенсивностей нейтронного и гамма-излучений от генератора нейтронов и изотопного источника.

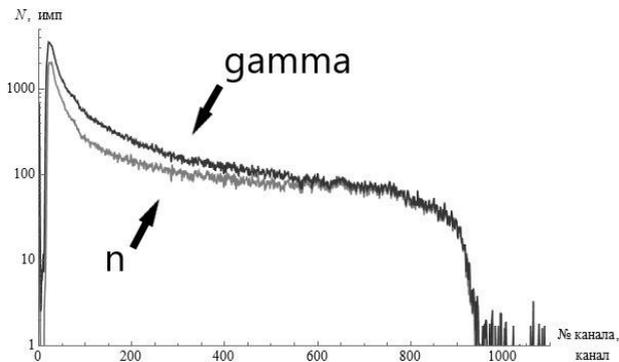


Рис. 1. Аппаратурный спектр смешанного гамма-нейтронного излучения импульсного нейтронного генератора с выделением нейтронной компоненты на органическом сцинтилляторе EJ-276

На данный момент решается задача по восстановлению энергетического спектра нейтронов импульсного нейтронного генератора по полученному с помощью PSD-разделения спектру отклика сцинтилляционного спектрометра на нейтронное излучение. Решение данной задачи позволит применять восстановление энергетических спектров нейтронов для других типов импульсных нейтронных источников в режиме онлайн.

Список литературы

1. C. Liao, H. Yang. Pulse shape discrimination using EJ-299-33 plastic scintillator coupled with a Silicon Photomultiplier array // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A (2015) P.1-8.
2. N. Dinar, D. Celeste et al. Pulse shape discrimination of CLYC scintillator coupled with a large SiPM array // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 935 (2019) P. 35–39.

А.Н. ШАБРОВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА) Москва, Россия*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ СКВАЖИННОГО ПРИБОРА ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ГАММА-КАРОТАЖА СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО (ИНГК-С)

В докладе рассмотрена виртуальная модель отображающая работу скважинного прибора импульсного нейтронного гамма-каротажа спектрометрического ИНГК-С в скважинных условиях. Модель математически описывает реальные ситуации эксплуатации прибора. Целью работы является выпуск математического и программного аппарата способного корректно работать с моделью во времени и предназначенного для получения спектров отклика химических элементов. При этом форма спектров расчетных должна совпадать с формой спектров, полученных при физических исследованиях. Под откликом понимается взаимодействие гамма-квантов с детектором прибора, количество зафиксированных от конкретного элемента гамма-квантов их энергии и распределения.

A.N. SHABROV

*¹All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov
(FSUE VNIIA), Moscow, Russia*

MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN THE OPERATION OF A DOWNHOLE PULSED NEUTRON GAMMA-RAY SPECTROMETRIC LOGGING

In the report, a virtual model is considered that displays the operation of a pulsed neutron gamma-ray spectrometric logging device in borehole conditions. The model mathematically describes the actual operating situations of the device. The purpose of this work is to produce a mathematical and software device that can work correctly with the model in time and is designed to obtain response spectra of chemical elements. In this case, the shape of the calculated spectra must match the shape of the spectra obtained in physical studies. The response refers to the interaction of gamma rays with the detector of the device, the number of gamma rays recorded from a specific element of their energy and distribution.

Исследованию подлежали: возникшие в генераторе нейтроны, их распространение по пространству модели, изменение их энергии, истории соударений с частицами исследуемой материи, истории жизни гамма-квантов возникших в результате ядерных реакций, типы этих реакций, а также взаимодействие гамма-квантов с бромидом лантана $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ – ядром детектора. В ходе исследований выполнено моделирование работы прибора в скважине. Был составлен математический и программный инструмент, предназначенный для получения требуемых форм спектров от различных скважинных пород. Решены следующие задачи:

1. Влияние детализации модели на выходные формы спектров.

2. Решение «нейтрон-фотон-электронной задачи».

3. Влияние откликов гамма-квантов дальних от детектора областей модели на формы спектров.

От корректности решения этих задач зависит точность моделирования и скорость вычислений. На основании проведенных исследований была разработана оптимальная расчетная модель, предназначенная для получения спектров отклика элементов. Собрана база расчетных спектров по ряду горных пород (кальциты, кварциты, доломиты, баженины разных составов и плотностей), отлажено математическое и программное обеспечение.

Полученные математическим путем спектры по форме совпали с формами спектров экспериментальных с погрешностью до 5%. Это приемлемая точность вычислений. Расчетная модель и связанное с ней обеспечение позволяет собирать отклики элементов скважинных пород математическим способом.

К.А. ШАРОВ, Е.В. РЯБЕВА, В.В. КАДИЛИН, А.Е. ШУСТОВ

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Проведен анализ зависимости решения по восстановлению спектров быстрых нейтронов от изменений входных данных по аппаратному спектру в пределах статистической или аппаратурной погрешности. В качестве тестового восстанавливаемого спектра рассматривается спектр нейтронов от источника деления (^{252}Cf). Моделируемым детектором является многослойный детектор нейтронов на основе замедляющих слоев полиэтилена и сцинтилляционных пластин ZnS(Ag)/LiF . Модель детектора, содержащая 12 регистрирующих слоев, была рассчитана в GEANT 4. Спектр нейтронов восстанавливается методом наименьших квадратов с наложением ограничений на решение и методом регуляризации Тихонова. Входные данные (аппаратный спектр) варьируется по нормальному закону распределения в пределах прогнозируемой статистической погрешности. Показана зависимость качества восстановления (отклонения тестового спектра от восстановленного) от погрешности входных данных. Внесены предложения по оптимизации модели детектора.

K.A. SHAROV, E.V. RYABEVA, V.V. KADILIN, A.E. SHUSTOV

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

ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE FAST NEUTRON SPECTRUM UNFOLDING METHOD WITH MULTILAYERES NEUTRON DETECTOR

Analysis of the dependence of the solution for reconstructing fast neutron spectrum depending on variations in the input data from the hardware spectrum within the margin of the statistical or hardware error is performed. The neutron spectrum from the fission source (^{252}Cf) is considered as a test reconstructed spectrum. The simulated detector is a multilayer neutron detector based on slowing-down layers of polyethylene and ZnS(Ag)/LiF scintillation plates. The detector model, which contains 12 recording layers, was simulated by GEANT 4. The neutron spectrum is reconstructed using the least squares method with restrictions on the solution and the Tikhonov regularization method. The input data (hardware spectrum) varies according to the normal distribution law within the limits of the predicted statistical error. The dependence of the quality of restoration (deviation of the test spectrum from the reconstructed spectrum) from the error of the input data is shown. There are suggestions for model detector optimization.

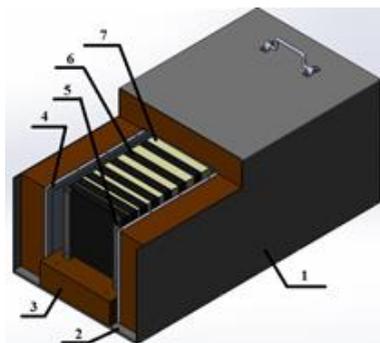


Рис.1. Модель многослойного детектора нейтронов

1 – внешний короб; 2 – основание; 3 – защита от рассеянного излучения (борированный полиэтилен); 4 – внутренний короб; 5 – стойка; 6 – регистрирующий модуль; 7 – замедлитель-полиэтилен

Многослойный детектор нейтронов содержит 12 регистрирующих нейтроны модулей и 13 модулей замедления нейтронов. В результате моделирования количества регистрируемых нейтронов для детектора из 12 слоёв была получена матрица отклика (Рис.2). Количество моделируемых нейтронов - $2 \cdot 10^6$ частиц для каждой энергии (от 0,1 МэВ до 15 МэВ). Источник изотропный и находится на расстоянии 50 см от переднего слоя.

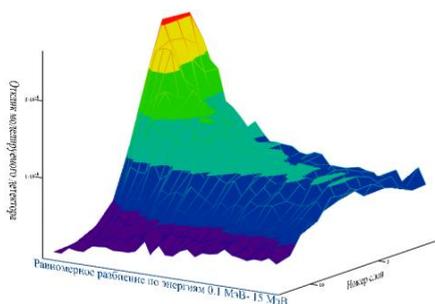


Рис. 2. 3D график матрицы отклика

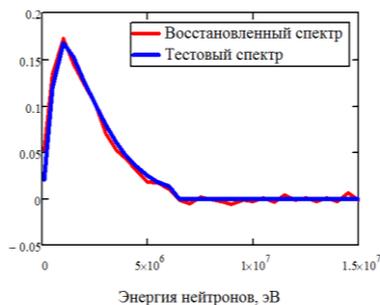


Рис. 3. Восстановление спектра методом регуляризации нейтронов источника ^{252}Cf

В работе производится восстановление спектра нейтронов, полученного в результате моделирования, используя МНК с условием на неотрицательность спектра нейтронов, а также метод регуляризации Тихонова с рассчитанным параметром регуляризации (Рис.3). Входные данные (количество зарегистрированных импульсов с помощью детектора по каждой энергетической группе) изменяли по нормальному закону распределения с различными СКО. Приведена зависимость максимальной относительной неопределённости выходного от максимальной неопределённости входных данных. Показана устойчивость метода регуляризации Тихонова.

А.Е. ШУСТОВ, А.И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, К.Ф. ВЛАСИК,
В.В. КАДИЛИН, З.М. УТЕШЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТКЛИКА ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Представлены результаты измерения отклика сигнала детектирующей ячейки многослойного детектора нейтронов. Ячейка состоит из сцинтиллятора ZnS+LiF с пластиковыми световодом и кремниевыми фотоумножителями. Для тестирования использовался источник коротких световых импульсов на основе светодиода и источник тепловых нейтронов на основе ^{252}Cf . Проведены измерения для определения оптимального светоотражающего покрытия для ячеек размером $100 \times 6 \times 6$ мм³. Проанализировано влияние положения сцинтилляционного экрана на засветку соседней ячейки.

A.E. SHUSTOV, A.I. ARKHANGELSKIY, K.F. VLASIK,
V.V. KADILIN, Z.M. UTESHEV

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

RESPONSE SIMULATION OF MULTILAYER NEUTRON DETECTOR PROTOTYPE

The results of measuring the response of the detection cell of a multilayer neutron detector are presented. The cell consists of a ZnS + LiF scintillator with a plastic light guide and silicon photomultipliers. For testing a source of short light pulses based on an LED and a source of thermal neutrons based on ^{252}Cf were used. Measurements were taken to determine the optimal reflective coating for cells of size $100 \times 6 \times 6$ mm³. The impact of the scintillation screen position on the cross-talk effect for the neighboring cells was analyzed.

Для проведения измерений на экспериментальной установке в качестве детектирующей ячейки используется прозрачный органический пластик без сцинтилляционных добавок размер $100 \times 6 \times 6$ мм³. К одной из граней по всей длине 100 мм приложена пластина сцинтиллятора ZnS+LiF, которая регистрирует тепловые нейтроны. Для измерения эффективности светосбора пластину оборачивают в один из следующих материалов: бумага на основе материала тайвек, майлар с односторонним отражающим покрытием, тефлоновая лента. К торцам пластины с каждой стороны прикреплен кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiPM) производства Sensl, модель MicroSB-60035-X13. Размер светочувствительной области 6×6 мм², что соответствует торцевой площади световода. SiPM прикреплен к пластику с использованием оптической смазки. Электрические сигналы от SiPM

усиливаются в 10 раз при помощи NIM модуля Caen n978 и поступают на вход осциллографа LeCroy 620Zi для анализа параметров.

Для оценки качества светоотражающих покрытий (тайвек, майлар, тефлон) применяется специальный источник света – светодиод, работающий в импульсном режиме и излучающий свет за короткое время порядка нескольких десятков наносекунд. Светодиод устанавливается в боковую грань световода на разном расстоянии от одного из SiPM. Так как толщина покрытия может меняться на разных участках детектирующей ячейки, для оценки эффективности светоотражающего покрытия используется отношения зарядов $C2/C1$, собранных от двух сигналов с SiPM 1 и SiPM 2. Заряд, или площадь под сигналом, лучше характеризует количество света, собираемого SiPM, т.к. амплитуда сигнала может зависеть от временного профиля интенсивности источника света.

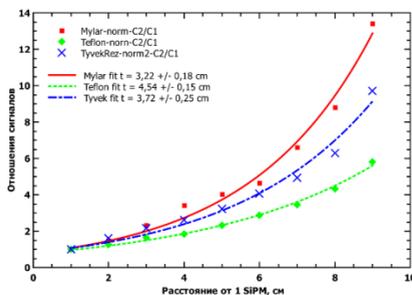


Рис. 1. Соотношение сигналов для различных покрытий.

На рис. 1 показано отношение сигналов $C2/C1$ с нормировкой в первой точке (1 см от первого SiPM). На графике представлены аппроксимирующие зависимости (возрастающая экспонента $y(x) = e^{x/t}$, где t – константа, соответствующая длине ослабления света в детектирующей сборке). На графике можно видеть, что для детектора, обернутого тефлоновой лентой, амплитуда сигнала затухает медленнее по сравнению с другими покрытиями.

В результате проведенных работ измерены параметры сигнала, регистрируемого детектирующей ячейкой прототипа многослойного детектора нейтронов. При измерении эффективности светосбора для различных покрытий оптимальным выбором оказался тефлон.

А.Е. ШУСТОВ, К.Ф. ВЛАСИК, В.В. КАДИЛИН, З.М. УТЕШЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ПРОТОТИПА МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Представлены результаты численного моделирования прототипа многослойного детектора нейтронов. Разработано программное обеспечение на основе пакета Geant4 для моделирования взаимодействия нейтронов с окружающим прибором веществом и детектирующими ячейками на основе сцинтиллятора ZnS+LiF с пластиковыми световодом и кремниевыми фотоумножителями. Проведено моделирование для оптимизации толщины защитного слоя из борированного полиэтилена. Представлены результаты моделирования количества нейтронов, регистрируемых в каждом слое для различных энергий частиц.

A.E. SHUSTOV, K.F. VLASIK, V.V. KADILIN, Z.M. UTESHEV

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

RESPONSE SIMULATION OF MULTILAYER NEUTRON DETECTOR PROTOTYPE

The results of a numerical simulation of a prototype multilayer neutron detector are presented. The Software was developed on the basis of the Geant4 package for modeling the interaction of neutrons with the device environment and detection cells based on the ZnS + LiF scintillator with plastic light guide and silicon photomultipliers. Modeling was carried out to optimize the thickness of the protective layer of boron polyethylene. The results of modeling the number of neutrons detected in each layer for different particle energies are presented.

Для моделирования взаимодействия нейтронов с многослойным детектором нейтронов и анализа результатов расчетов разработан пакет программ с применением библиотек Geant4 версии 4.9.4. В качестве списка физических процессов (Physics List) использовался набор QGSC_BERT_HP с улучшенным описанием взаимодействия нейтронов с энергиями менее 20 МэВ.

Конструкция прибора имеет 12 слоёв, состоящих из 10 пластиковых (оргстекло/плексиглас) пластин размером 100x6x6 мм³, которые являются детектирующими ячейками. Одна из граней пластиковых пластины в контакте со сцинтилляционным экраном ZnS(Ag):6LiF (4:1). Между детектирующими слоями располагается замедлитель из полиэтилена, заданной толщиной. Вокруг многослойной сборки располагается слой полиэтилена с добавлением В4С.

Для моделирования рассеянного излучения нейтронов детектор расположен в центре помещения размером 5x5x2.5 м. Источник изотропный и размещен на

расстоянии 50 см от первого слоя. Для моделирования отклика использовалась комбинация замедляющих слоёв с толщинами от 5 до 50 мм.

На рис. 1 представлен отклик прибора в эксперименте с испусканием из источника 2 млн. нейтронов для каждой энергии частицы.

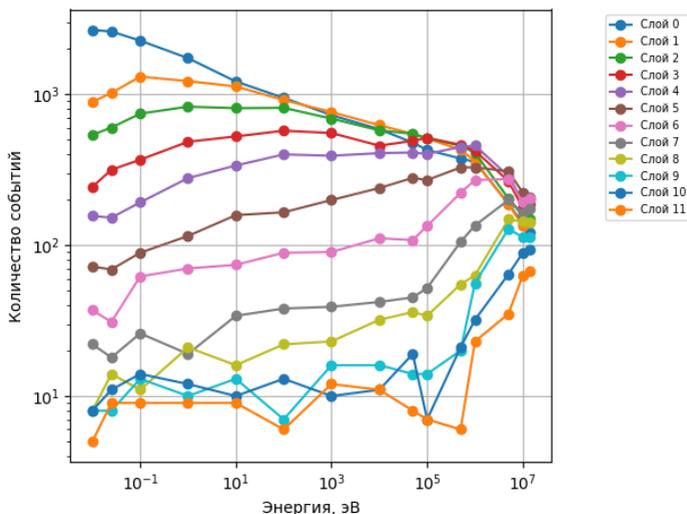


Рис. 1. График зависимости темпа счета нейтронов в разных слоях многослойного детектора нейтронов.

Темп счёта от каждой из 10 детектирующих ячеек в слое просуммирован послыно. Нумерация слоёв начинается с нуля.

Разработанная программа необходима для моделирования отклика многослойного детектора нейтронов и в дальнейшем будет использоваться для создания матрицы приборных функций с целью восстановления первичных спектров нейтронов, которые облучают детектор.