

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ»
ЛАПЛАЗ-2021**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Часть 2

Москва

УДК:001.89[621.373.8+533.9+539.2+621.384](06)

ББК 72

М 43

VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021: Сборник научных трудов. Ч.2. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – 479 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2021», которая пройдет с 23 по 26 марта 2021 года в дистанционном формате. Организатором конференции выступает Институт лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: лазерная физика и лазерные технологии; физика плазмы и плазменные технологии; сверхсильные лазерные поля; управляемый термоядерный синтез; современные проблемы теоретической физики; современные проблемы физики твердого тела, функциональных материалов и наносистем; ускорители заряженных частиц и радиационные технологии; современные проблемы квантовой метрологии, физика высокой плотности и энергии, электрофизическое и ядерное приборостроение.

Статьи получены до 10 марта 2021 года. Материалы издаются в авторской редакции.

Ответственный редактор: Крупышева П.О.

ISBN 978-5-7262-2767-2

©Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2021

Подписано в печать. Формат

*Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» Типография НИЯУ МИФИ 115409, Москва, Каширское ш.,31*

Программный комитет конференции

- Гаранин Сергей Григорьевич – академик РАН, директор Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ -- председатель Программного комитета
- Кузнецов Андрей Петрович – д.ф.-м.н., директор Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ – зам. председателя Программного комитета
- Батани Дино Димитри – Университет Бордо, Франция
- Бармаков Юрий Николаевич – д.т.н., первый заместитель научного руководителя ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, и.о. директора Института физико-технических интеллектуальных систем НИЯУ МИФИ
- 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
- Ильяев Радий Иванович – академик РАН, почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ
- Колачевский Николай Николаевич – член-корр. РАН, директор Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
- Кудряшов Николай Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика» 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 №4 НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Масленников С.П. – профессор кафедры №24 НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета

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

Содержание

Содержание	5
Секция ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	25
Г.П. АВЕРЬЯНОВ, В.В. ДМИТРИЕВА, А.М. КОНЕВ, И.А. КУНОВ, Е.М. НОСОВА <u>ОЦЕНКА ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДАМИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ</u>	26
Г.А. МЕЕРОВИЧ, Е.В. АХЛЮСТИНА, И.Д. РОМАНИШКИН, Е.А. КОГАН, М.Г. СТРАХОВСКАЯ, К.Г. ЛИНЬКОВ, С.А. ГОНЧУКОВ, В.Б. ЛОЩЕНОВ <u>ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТА ПРИ ФОТОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В ТОНКИХ СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ СЛОЯХ</u>	28
М.Р. БУТАЕВ, В.И. КОЗЛОВСКИЙ, Я.К. СКАСЫРСКИЙ <u>ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИСКОВЫЙ ЛАЗЕР С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 497 НМ</u>	31
Я.В. ГРУДЦЫН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ, Л. В. СЕЛЕЗНЁВ, Ю.А. ГЕРАСИМОВА, А.А. РОГАШЕВСКИЙ <u>ВНУТРИИМПУЛЬСНАЯ РАЗНОСТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТЫ В СРЕДНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ (8.5-13.5 МКМ) ПОСЛЕ УШИРЕНИЯ СПЕКТРА СО СМЕЩЕНИЕМ В КРАСНУЮ ЧАСТЬ В ПОСТФИЛАМЕНТАЦИОННОМ КАНАЛЕ</u>	33
В.Е. ГРИШКОВ, С.А. УРЮПИН <u>ГЕНЕРАЦИЯ ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРЕ ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛ, НА КОТОРУЮ ВОЗДЕЙСТВУЕТ СФОКУСИРОВАННЫЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ИМПУЛЬС</u>	35
А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, Д.А. КОМАРОВ, А.Ю. КОЗЛОВ, О.А. РУЛЕВ, Д.В. СИНИЦЫН <u>ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ ИЗЛУЧЕНИЯ СО-ЛАЗЕРА ПРИ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ В НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ ZNGEP2</u>	37
О.В. РОЗОВА, В.А. СТЕПАНОВ <u>ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ КЛЕТОЧНЫХ КУЛЬТУР НЕК-293</u>	40

Ю.К. СЕДОВА, С.А. МИНАЕВА, Е.В. ИВАНОВСКАЯ, Е.Д. МИНАЕВА, Н.В. МИНАЕВ, Т.С. ДЕМИНА <u>ПОЛИМЕРНЫЕ МИКРОЧАСТИЦЫ СОДЕРЖАЩИЕ НАНОЧАСТИЦЫ ГИДРОКСИАПАТИТА ДЛЯ БИМЕДИЦИНЫ</u>	42
И.Н. ЗАВЕСТОВСКАЯ, В.А. ГУЩИН, М.А. НИКИФОРОВА, Л.И. РУССУ, Е.А. ЧЕШЕВ, А.Л. КОРОМЫСЛОВ, И.М. ТУПИЦЫН, А.А. ФРОНЯ, М.С. ГРИГОРЬЕВА <u>ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 370 НМ И 405 НМ НА ИНФИЦИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА КОРОНАВИРУСА</u>	45
И.Н. БУРДОНСКИЙ, А.Г. ЛЕОНОВ, В.Н.ЮФА, А.М. САДОВСКИЙ, А.Ю. ВОЛЧЕНКО, Д.А. ПЕТУШКОВ <u>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНЫХ И КАМЕННЫХ МИШЕНЕЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ АСТЕРОИДНОКОМЕТНОЕ ВЕЩЕСТВО</u>	47
В.И. ЖУРАВЛЕВА, М.И. МАРКЕВИЧ, А.Б. КАМАЛОВ, Д.Ж. АСАНОВ, А.М. ЧАПЛАНОВ <u>ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ</u>	50
В.П. БИРЮКОВ <u>ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ 34ХНЗМА НА ПАРАМЕТРЫ ЗОН ЗАКАЛКИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</u>	54
В.П. БИРЮКОВ <u>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ</u>	57
А.Д. ВОРОНЦОВА А.В. ШУТОВ <u>ФИЛАМАНТАЦИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИННОЙ ВОЛНЫ 248 НМ В ВОЗДУХЕ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ И ОСНОВНЫХ ВХОДЯЩИХ В ЕГО СОСТАВ ГАЗАХ</u>	59
А.А. ГАРМАТИНА, М.М. НАЗАРОВ, Б. Г. БРАВЫЙ, В. М. ГОРДИЕНКО <u>РЕНТГЕНОВСКИЙ ОТКЛИК ПРИ КОНТРОЛИРУЕМОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА НА МИШЕНЬ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ</u>	62
К.А. ГЛУШКОВ, И.Б. МУХИН <u>ГЕНЕРАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ ИЗ СУБ-ПС ЛАЗЕРА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ</u>	65
А.И. ГОРОХОВ, И.Б. МУХИН <u>СИСТЕМА СТРЕТЧЕР-КОМПРЕССОР НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ЧИРПИРУЮЩИХ БРЕГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ВЫСОКОМОЩНОГО ДИСКОВОГО ЛАЗЕРА</u> .	67

Е.А. ДАНИЛОВ, С. А. УРЮПИН_ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ТОНКУЮ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКУ.....	70
О.В. ДЕВИЦКИЙ_ФЛУКТУАЦИИ СОСТАВА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ INXGA1-XAS1-YRU , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ SI	72
Е.О. ЕПИФАНОВ, А.Г. ШУБНЫЙ, Н.В. МИНАЕВ, А.О. РЫБАЛТОВСКИЙ, О.П. ПАРЕНАГО_ФОРМИРОВАНИЕ НАНЕСЕННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО CO_2	74
В.С. ЖИГАРЬКОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ_ЛАЗЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ МИКРОБНЫХ СИСТЕМ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ.....	76
А.В.ИВАЩЕНКО, Д.А. КОЧУЕВ, Н.Н. ДАВЫДОВ_ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ	78
Е.В. ИОНУШАЙТЕ, А.В. ШУТОВ_ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАВИНЫ В ФОТОИОНИЗАЦИОННОЙ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЕ 25-НАНОСЕКУНДНОГО 248-НМ ИМПУЛЬСА KRF ЛАЗЕРА.....	80
А.В. КОЛЧИН, С.В. ЗАБОТНОВ, Д.В. ОРЛОВ, Д.В. ШУЛЕЙКО, Л.А. ГОЛОВАНЬ, Д.Е. ПРЕСНОВ, Т.П. КАМИНСКАЯ, П.И. ЛАЗАРЕНКО, С.А. КОЗЮХИН, Т.С. КУНКЕЛЬ, П.К. КАШКАРОВ_ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ	82
Д.А. ЗАЗЫМКИНА, А.А.ИОНИН, И.О.КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю.КОЗЛОВ, Д.И.КОРМАШОВА, А.А. КОТКОВ, Ж.Ф.ЛАМПИН, Ю.А.МИТЯГИН, С.А. САВИНОВ, А.М.САГИТОВА, Д.В.СИНИЦЫН, М.В.ИОНИН_ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО NH_3 -ЛАЗЕРА С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ ИМПУЛЬСАМИ CO_2 -ЛАЗЕРА ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ~ 100 МКС	84
И. В. КРЫЛАЧ, М.И. ФОКИНА, С. И. КУДРЯШОВ, В. Е. СИТНИКОВА, М. К. МОСКВИН, Е.О. САМУЙЛОВА, Р.О. ОЛЕХНОВИЧ, А.В. ВЕНИАМИНОВ, М.В. УСПЕНСКАЯ_ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ КАК СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА УГЛОВ СМАЧИВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ ПРИ ОДНОЭТАПНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ.....	86

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В НЕОДНОРОДНЫХ СВЕТОВОДАХ	88
И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, П.П. МИРОНОВ, Д.И. СЕМЕНЦОВ ДИНАМИКА ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В УСЛОВИЯХ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ	90
В.В. БАЛАШОВ, В.В. БЕЗОТОСНЫЙ, Л.Ю. ЗАХАРОВ, А.В. ИНЮШКИН, А.Ю. КАНАЕВ, А.Б. КОЗЛОВ, С.М. КОЗЛОВА, А.Л. КОРОМЫСЛОВ, К.В. ЛОПУХИН, В.А. ЛУЗАНОВ, К.С. ПЕРВАКОВ, И.М. ТУПИЦЫН, Д.А. ЧЕРНОДУБОВ, А.Е. ЧЕШЕВ_СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННОЙ УВ (3+) ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ LUYAG: ОПТИЧЕСКИЕ, СТРУКТУРНЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ СВОЙСТВА	93
В.К. ШЕЛЕГ, Н.И. ЛУЦКО, А.С. ЛАПКОВСКИЙ_ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА НАПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРОМ ВАЛИКОВ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА И БРОНЗЫ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ	96
Н.П. ВАГИН., С.А. ЛЫСЕНКО, Н. Н. ЮРЫШЕВ_ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ СЛОЕВ ИЗ КОМПОЗИТА SI-SiC	99
А.Н. МАРЕСЕВ, М.А. ШЕВЧЕНКО, Н.В. ЧЕРНЕГА, С.Ф. УМАНСКАЯ, А.Д. КУДРЯВЦЕВА_ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НЕУПОРЯДОЧЕННЫМИ НАНО- И СУБМИКРОННЫМИ СИСТЕМАМИ.....	101
А.А. МАТРОХИН, М.А. ШЕВЧЕНКО, Н.В. ЧЕРНЕГА, А.Д. КУДРЯВЦЕВА, С.Ф. УМАНСКАЯ_ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НА НАНО И СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУРАХ	103
Н.В. МИНАЕВ, Е.О. ЕПИФАНОВ, А.А. АНТОШИН, Е.А. МИГАЛЬ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ДВУХФОТОННАЯ МИКРОСТЕРЕОЛИТОГРАФИЯ И БИОПЕЧАТЬ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРОИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ДЛ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ	105
М.К. МОСКВИН, Д.С. ЮЖАКОВА, Н.А. АФАНАСЬЕВ, Е.В. ПРОКОФЬЕВ, Д.А. СИНЕВ, Г.В. ОДИНЦОВА_ФОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫМ ЦВЕТОМ.....	108

С.П. НИКИТИН, А.В. ШУТОВ, В.Д. ЗВОРЫКИН ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ИНФРАКРАСНОЙ КОНИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ФИЛАМЕНТОВ ГИГАВАТТНЫХ УФ ИМПУЛЬСОВ В КСЕНОНЕ.....	110
М.В. АНТИПОВ, Д.А. ПОЛШКОВ МЕТОД ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛЬНЫХ СВЕТОВЫХ ПОМЕХ.....	112
А.Г. ПУТИЛОВ, А.А. АНТИПОВ, А.Е. ШЕПЕЛЕВ, А.В. ОСИПОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ, СПЕКТРАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНОГО ЛАЗЕРА НА АЛЕКСАНДРИТЕ	114
А. РАМОС ВЕЛАСКЕС, Н.О. ГУДЗ, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, В.П. ВЕЙКО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ПЕРЕНОС ПОЛИХРОМНЫХ МЕТОК НА ПОВЕРХНОСТЬ СТЕКЛА.....	117
Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, В.Н.НЕВОЛИН, Д.В. ФОМИНСКИЙ ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ НАНО-ПЛАСТИНЧАТЫХ ПЛЕНОК WSe ₂ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРОКАТАЛИЗА ВОДОРОДА НА ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЕ A-MOS ₄ /WSe ₂	120
В.С. РЫМКЕВИЧ, М.М. СЕРГЕЕВ ВЛИЯНИЕ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА НА МИКРО ОБРАБОТКУ СТЕКЛА ЛАЗЕРНО ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ.....	122
А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ, А.А. КОТКОВ, А.М САГИТОВА, Д.В. СИНИЦЫН ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ СРЕДНЕГО ИК- ДИАПАЗОНА.....	124
Т.А. СЕМЕНОВ, К.А. ИВАНОВ, И.Н. ЦЫМБАЛОВ, Р.В. ВОЛКОВ, И.А. ЖВАНЯ, М.С. ДЖИДЖОЕВ, А.В. ЛАЗАРЕВ, А.Б. САВЕЛЬЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ НАНОПЛАЗМЕ КРИПТОНА.....	126
Т.А. СЕМЕНОВ, К.А. ИВАНОВ, И.Н. ЦЫМБАЛОВ, Р.В. ВОЛКОВ, И.А. ЖВАНЯ, М.С. ДЖИДЖОЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО, А.Б. САВЕЛЬЕВ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИШЕНЕЙ И НАНОАГРЕГАТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЛАЗЕРНОГО ПОЛЯ.....	130
А.В. СКОБЛЯКОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, О. Н. РОЗМЕЙ, М.М. ГУРДЮМОВ, М. М. ГЮНТЕР, П. ТАВАНА, А.А. ГОЛУБЕВ ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА GEANT4 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ	

ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ	133
А.И. САВЕЛЬЕВА, В.В. ФИЛАТОВ <u>РАСЧЕТ ЭФФЕКТА СУПЕРЛИНЗИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЛОБУЛЯРНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ОПАЛА</u>	137
И.В. ФИРСОВ, Д.А. КОЧУЕВ, А.Н. ЗОЛОТОВ, А.Ф. ГАЛКИН, А.С. ЧЕРНИКОВ <u>ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ЭРОЗИОННОГО ФАКЕЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ</u>	140
А.А. ФРОЛОВ <u>ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ S-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМОЙ</u>	143
Л.Ф. ХАЕРТДИНОВА, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Э.Р. ТОЛОРДАВА, С.И. КУДРЯШОВ, А.А. ИОНИН <u>АППЛИКАЦИОННЫЙ ЛАЗЕРНО-ГЕНЕРИРОВАННЫЙ ПЕРЕНОС ДЛЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ</u>	145
А.А. ШЕРНИЁЗОВ, Ш.Д. ПАЙЗИЕВ, Х.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ, А.Г. КАХХОРОВ, Ш.А. БЕГИМКУЛОВ, А.Г. АЛИБОВЕВ, Ф. КАМОЛИДДИНОВ, Ф.А. ШЕРМАТОВА <u>ЭФФЕКТИВНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЛАЗЕР НА SE:ND:YAG С БОКОВОЙ НАКАЧКОЙ В МНОГОПРОХОДНОЙ СХЕМЕ</u>	147
В.А. ШКУРАТОВА, Г.К. КОСТЮК, А.А. ПЕТРОВ, А.А. САМОХВАЛОВ <u>ФАЗОВЫЕ МАСКИ ИЗ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН ДЛЯ ОЧЕРТЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ПЛОСКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ</u>	149
А.Г. ШУБНЫЙ, Е.О. ЕПИФАНОВ, Н.В. МИНАЕВ, В. И. ЮСУПОВ, А.О. РЫБАЛТОВСКИЙ <u>МЕТОД ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ НАНОЧАСТИЦ AU/AG</u>	151
В.М. ЯМЩИКОВ <u>ВЛИЯНИЕ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ НА КИНЕТИКУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ И ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ НАКАЧКИ</u>	153
Б.В. РУМЯНЦЕВ, Е.И. МАРЕЕВ, А.С. БЫЧКОВ, А.А. КАРАБУТОВ, Е.Б. ЧЕРЕПЕЦКАЯ, В.А. МАКАРОВ <u>Ф.В. ПОТЁМКИН ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННОГО И УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СФОКУСИРОВАННОГО</u>	

ФЕМТОСЕ-КУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ОБЪЁМОМ СРЕДЫ	156
Д.С. ЛУТОШИНА, А.А. МОРОЗОВА, В.В.РОМАНОВ, Г.В. ОДИНЦОВА СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА, ОБРАЗОВАННЫХ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ	160
А.С. БЕЛОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, А.П. КУЗНЕЦОВ_РАЗРАБОТКА ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА «МИФИСТ»	163
ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ ОПТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ: ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	165
В.Д. ВОРОНОВ, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, Е.В. ХРИПТОВИЧ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ.....	167
А.С. ЩЕКИН, Д.Р. ГАШИГУЛЛИН, С.А. ГЛАЗЫРИНА, А.А. ГАВРИКОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.А. ОРЕШКИН_ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ РЕЗКЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА.....	170
Р.Р. КОКОЕВ, Ю.В. КАРГИНА, Г.В. ТИХОНОВСКИЙ, А.Ю. ХАРИН, А.А. ПОПОВ, М.В. ШЕСТАКОВ, В.Ю. ТИМОШЕНКО_СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ, МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ	173
О.Б. АНАНЬИН, Р.Ш. РАМАКОТИ, А.П. МЕЛЕХОВ, В.В.КРАВЧЕНКО, И.А. ГЕРАСИМОВ, Г.С. БОГДАНОВ_О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ.....	176
К.С. ЛУКЪЯНОВ, К.Л.ГУБСКИЙ, И.Ю. ТИЩЕНКО_РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ КСПУ-Т	178
А.С. ЩЕКИН, С.А. ГЛАЗЫРИНА, А.А. ГАВРИКОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.А. ОРЕШКИН_ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ КЕРАМИКИ Al_2O_3 ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ	180
А.С. ЩЕКИН, Д.Р. ГАШИГУЛЛИН, С.А. ГЛАЗЫРИНА, А.А. ГАВРИКОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.А. ОРЕШКИН_ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО	

ВЛИЯНИЯ ПРИ РЕЗКЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА.....	182
Э. Н. ЦОЙ, Л. А. СУЮНОВ <u>О</u> ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ В КОЛЬЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ	185
А. В. ПЛАТОНОВ, В. Н. ПЕТРОВСКИЙ, О.М. ОРЕШКИН ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ СТРУКТУРИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕПЛАВЛЕНИЯ.....	187
А.А. ГАРМАТИНА, А.Г. ШУБНЫЙ, А.Д. НУЖДИН, В.Е. АСАДЧИКОВ, А.И. БАРАНОВ, Д.В. МЯСНИКОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С МИШЕНЬЮ В ВОЗДУХЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ	190
Секция ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ.....	194
А.И. АЛИЕВА, С.А. КРАТ, С.А. ГАНИН, Н.Е. ЕФИМОВ, А.С. ПРИШВИЦЫН, Г.М. ВОРОБЬЁВ, В.А. КУРНАЕВ <u>СИСТЕМА</u> СВЧ – ПРЕДЫОНИЗАЦИИ МАЛОГО СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА МИФИСТ.....	195
А.С. АСЕЕВ, В.И. ЗАЙЦЕВ, И.А. БАРЫКОВ <u>ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ</u> ДЕТЕКТОР В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	197
Р.Б. БЕГРАМБЕКОВ, Н.С. ПУНТАКОВ, А.М. ЗАХАРОВ АСПЫЛЕНИЕ И МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ «АКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ».....	198
О.С. БЕЛОЗЕРОВ, С.А. ХРОМОВ, С.А. ДАНЬКО <u>ДВА</u> МЕХАНИЗМА УСКОРЕНИЯ ИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ГЕНЕРАТОРЕ РЭП «КАТРАН».....	201
В.В. КРАВЧЕНКО, Д.П. КНЯЖЕВ, Д.Д. БЕРНТ, А.А. ПИСАРЕВ ВЛИЯНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА W-СЛОЕВ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ МОДУЛЕЙ	204
К.Ю. ВАГИН, С.А. УРЮПИН <u>СТОЛКНОВИТЕЛЬНАЯ</u> ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СЛАБОИОНИЗОВАННОГО КОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ ИНЕРТНОГО ГАЗА	207

Е.А. ВИНИЦКИЙ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, А.С. ПРИШВИЦЫН, Г.М. ВОРОБЬЁВ, В.А. КУРНАЕВ, Н.Е. ЕФИМОВ, С.А. КРАТ ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ КАТУШЕК ТОКАМАКА МЕРНИСТ.....	209
Ю.М. ГАСПАРЯН, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Е.Д. ВОВЧЕНКО, Н.Е. ЕФИМОВ, В.С. ЕФИМОВ, С.А. КРАТ, М.А. ПОПОВА <u>АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПОВЕРХНОСТЬ НАСЫЩЕННЫХ ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА МАТЕРИАЛОВ</u>	211
Р.О. ГАВРИЛИН, А.О. ХУРЧИЕВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, С.А. ВЫСОЦКИЙ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ, И.В. РУДСКОЙ, А.А. ГОЛУБЕВ, В.А. ВОЛКОВ, А.А. ДРОЗДОВСКИЙ, Р.П. КУЙБЕДА, П.А. ФЕДИН, С.М. САВИН, А.П. КУЗНЕЦОВ <u>ИЗМЕРЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ПОТЕРЬ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА С ЭНЕРГИЕЙ 100 КЭВ/А.Е.М. В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ</u>	214
С.А. ГАНИН, Н.Е. ЕФИМОВ, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.И. АЛИЕВА С.А. КРАТ <u>ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА МИФИСТ</u>	217
В.И. ЖУКОВ, Д.М. КАРФИДОВ <u>ФОРМИРОВАНИЕ СВЧ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ В ЗАДАННОМ ПОЛЕ</u>	219
А.А. ЗВОНАРЕВА, А.Ю. МИРОНОВ, Н.В. НАГОРНЫЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ EPICS В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ	221
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. Б.Р. КАХРАМОНОВ, ХАРЬЯКОВ В.П. <u>К ВОПРОСУ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВАКУУМНОДУГОВОГО РАЗРЯДА</u>	223
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	225
В.В. КАЧМАР, В.Д. БОРЗОСЕКОВ, Н.Н. СКВОРЦОВА, А.А. СОРОКИН МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТАНТАЛА И МОЛИБДЕНА В ГИРОТРОННОМ РАЗРЯДЕ В ПОРОШКЕ РЕГОЛИТА	227
Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ <u>ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ В ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ</u>	229
Д.Л. КИРКО, П.П. СИДОРОВ, О.А. БАШУТИН, А.С. САВЕЛОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНООБРАЗНЫХ СТРУКТУР НА ЭЛЕКТРОДАХ В НИЗКОИНДУКТИВНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЕ	231

Д.С. КОЛЕСНИКОВ, А.В. СКОБЛЯКОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.А. ГОЛУБЕВ <u>МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СПЕКТРОГРАФОМ СКОЛЬЗЯЩЕГО ПАДЕНИЯ</u>	233
А.А. КОЛЕСНИЧЕНКО <u>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ ПУЧКОВОГО ТРАКТА СИСТЕМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТЯР</u>	235
С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ <u>МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОЛЛАЙДЕРА NISA С ВЫСОКОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ</u>	237
А.В. БЕРНАЦКИЙ, В.В. ЛАГУНОВ, В.Н. ОЧКИН <u>ДИНАМИКА ПЛОТНОСТИ МОЛЕКУЛ O₂ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ</u>	239
И.Г. ЛЕБО, Г.В. ДОЛГОЛЕВА <u>К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ НЕЙТРОННОГО ТИСТОЧНИКА ДЛЯ ЯДЕРНО-ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ЛАЗЕРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ</u>	241
В.Ю. ЛИСЕНКОВ, А.В. КАЗИЕВ, М.М. ХАРЬКОВ, А.В. ТУМАРКИН, Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, А.В. ИВАНОВА <u>МЕТАЛЛИЗАЦИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК МЕДЬЮ В МАГНЕТРОНЕ С РАСПЛАВЛЕННЫМ КАТОДОМ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ НАНЕСЕННОГО СЛОЯ</u>	243
К. Ю. ВАГИН, Т. В. МАМОНТОВА, С. А. УРЮПИН <u>ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ С ПЛАЗМОЙ, ОБРАЗОВАННОЙ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ ИНЕРТНОГО ГАЗА</u>	245
Е.Д. МАРЕНКОВ, А.С. КУКУШКИН, А.А. ПШЕНОВ <u>МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЛИТИЕВОЙ МИШЕНИ ДИВЕРТОРА В КОДЕ SOLPS 4.3</u>	247
К. Г. МОШКИНА, В.Д. БОРЗОСЕКОВ, Н. Н. СКВОРЦОВА, А. А. СОРОКИН <u>ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО НАПЫЛЕНИЮ РЕГОЛИТА НА ПЛАСТИНЫ ТАНТАЛА И МОЛИБДЕНА В ГИРОТРОННОМ РАЗРЯДЕ</u>	250
С.М. МУРОМСКИЙ, А.Е. ЕВСИН, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ <u>ВЛИЯНИЕ БУФЕРНОГО СЛОЯ FE-CR-AL НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОТОКОМ СВИНЦА</u>	252
М.А. КОВТУН, А.В. ПРОКОПЕНКО <u>РАЗРАБОТКА МОЩНОГО БАКТЕРИЦИДОГО РЕЦИРКУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ СВЧ РАЗРЯДА</u>	255

К.А. РОГОЗИН, М.Н. СОКОЛОВ, В.С. КВАСКОВ, С.В. БЕЛОУСОВ ¹ А.А. КОНЬКОВ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ, В.П. БУДАЕВ <u>ПОРТАТИВНЫЙ ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ОБРАБОТКИ БЫТОВЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ</u>	257
В. Ю. САВИН, В. Д. ПУСТОВИТОВ <u>КОНВЕРСИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ТОКА ПЛАЗМЫ В КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СРЫВАХ В ТОКАМАКЕ</u>	259
А.В. САНДОМИРСКИЙ, А.А. ЛИЗУНОВ <u>ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕЗАРЯДНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЛЕНИЯ ИОНОВ ПЛАЗМЫ В ЛИНЕЙНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ</u>	262
Р.А. СЕЛИВАНОВ, И.А. СОРОКИН <u>ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА УСТАНОВКЕ ПР-2</u>	264
Н.С. СЕРГЕЕВ, А.В. КАЗИЕВ, Ю.М. ГАСПАРЯН <u>ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПРИМЕСИ ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕ ИНДУКЦИОННОГО ВЧ-РАЗРЯДА</u>	267
Д.С. СТЕПАНОВ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ <u>ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В СВЧ ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ</u>	269
А.Б. ТАЖЕН, М.К. ДОСБОЛАЕВ, Т.С. РАМАЗАНОВ <u>ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ</u>	271
Г.П. ТИМКОВСКИЙ, А.Е. ЕВСИН, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, С.С. ДОВГАНЮК, И.Д. ЖДАНОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ <u>ОКСИДИРОВАНИЕ И НАВОДОРОЖИВАНИЕ ЦИРКОНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ И ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ</u>	273
Д. Л. УЛАСЕВИЧ, Р. Р. ХАЙРУТДИНОВ, В. Э. ЛУКАШ, А. С. ПРИШВИЦЫН, Н. Е. ЕФИМОВ, А. И. АЛИЕВА, С. А. КРАТ <u>ИЗУЧЕНИЕ РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА МИФИСТ-0</u>	276
М.М. ХАРЬКОВ, Г.И. РЫКУНОВ, А.В. КАЗИЕВ, М.С. КУКУШКИНА, М.В. ПРОЖЕГА, Е.О. РЕЩИКОВ, И.С. БАБИНЕЦ, П.П. БЕСШАПОВ, А.М. СТАСЕНКО, С.В. ЧЕРНЫШОВ <u>АНАЛИЗ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА ПРИ ОСАЖДЕНИИ ПЛЕНОК MO₂</u>	278

А.К. ХОМЯКОВ, С.А. КРАТ, А.С. ПРИШВИЦЫН, Е.А. ФЕФЁЛОВА, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ <u>ИЗУЧЕНИЕ</u> ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ И ДЕСОРБЦИЮ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ СООСАЖДЕННЫХ ЛИТИЕВЫХ СЛОЕВ	280
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ <u>К</u> ВОПРОСУ МЕХАНИЗМОВ F-T ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ.....	282
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ.....	284
Р.А. ЯХИН, С.Ю. ГУСЬКОВ, Н.Н. ДЕМЧЕНКО, Н.В. ЗМИТРЕНКО, П.А. КУЧУГОВ <u>ИССЛЕДОВАНИЕ</u> ОСОБЕННОСТЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МАЛОПЛОТНОМ ПОРИСТОМ ВЕЩЕСТВЕ	287
Секция УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	289
Н.П. СОБЕНИН <u>К</u> 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА, ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ЛАУРЕАТА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРЕМИИ СССР, ЗАСЛУЖЕННОГО ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ СССР ОЛЕГА АНАТОЛЬЕВИЧА ВАЛЬДНЕРА	290
И.Н. МЕШКОВ <u>СТАТУС</u> И ПЛАНЫ ПРОЕКТА NISA ОИЯИ... 298	298
С.А. МЕЛЬНИКОВ, И.Н. МЕШКОВ <u>ОБЪЕДИНЕННЫЙ</u> ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ДУБНА, РОССИЯ.....	299
МИНИМИЗАЦИЯ ИМПЕДАНСА КОЛЕЦ КОЛЛАЙДЕРА NISA	299
Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ <u>СПИНОВАЯ</u> ХРОМАТИЧНОСТЬ ПУЧКА: УДЛИНЕНИЕ ОРБИТЫ И БЕТАТРОННАЯ ХРОМАТИЧНОСТЬ	301
У. СНАЕ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ, М. ЗОБОВ МИКРОВОЛНОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ПРОЕКТИРУЕМОМ ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR*	303
С.В. МАЦИЕВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ <u>ПОДГОТОВКА</u> ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR*	305
В.С. ДЮБКОВ, М.В. ЛАЛАЯН, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ.....	307

Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ, А.В. САМОШИН_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА УСРЕДНЕНИЙ ПО БЫСТРЫМ ОСЦИЛЛЯЦИЯМ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПУЧКОВ ИОНОВ	309
А.П. ДУРКИН, А.А. КОЛОМИЕЦ , В.В.ПАРАМОНОВ_АНАЛИЗ СХЕМ ФОКУСИРОВКИ В ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ.....	311
С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ, М. КРАСИЛЬНИКОВ ФОТОЭМИССИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ С БОЛЬШИМ ЗАРЯДОМ В ВЧ ПУШКАХ.....	313
Д. И. ГАРАЕВ, А. А. ТИЩЕНКО, Д. Ю. СЕРГЕЕВА_РАССЕЯНИЕ ПОЛЯ РЕЛЯТИВИСТКОГО ЗАРЯДА НА КЛАСТЕРЕ МИКРОТЕЛ.....	315
А.В. НЕСТЕРОВИЧ__УСКОРИТЕЛЬ ЧАСТИЦ, ИМЕЮЩИХ МАГНИТНЫЙ ЗАРЯД.....	317
А.Е. АКСЕНТЬЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ_УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ, РАБОТАЮЩЕМ В СПИН-ПРОЗРАЧНОМ РЕЖИМЕ	319
А.В. ЗИЯТДИНОВА, П.А. ФЕДИН, Т.В. КУЛЕВОЙ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В «РЕАЛЬНЫХ» ПОЛЯХ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА СИЛЬНОТОЧНОГО ИНЖЕКТОРА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ НА БАЗЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ.....	321
Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ, Н.Н. ТУРАЕВА РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ	323
К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, П.А. ФЕДИН, Р.П. КУЙБИДА, А.В. КОЗЛОВ, А.Ю. ЛУКАШИН, П.А. БОГОСЛОВСКИЙ, С.В. ЛЕЩЕНКО, С.А. ТРЯПКИН, Т.В. КУЛЕВОЙ_ИМИТАЦИОННЫЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА УСКОРИТЕЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ТИПР-1	325
К.С. САГАН__РАСЧЕТ ПОРОГА МИКРОВОЛНОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ (ИССИ 4) С ПОМОЩЬЮ БИБЛИОТЕКИ RҮNEADTAIL ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ RҮTHON	327
И.В. НОВИКОВ__РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ПРОВОДЯЩЕЙ СТРУКТУРЕ С ВРАЩАТЕЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ	330

С.В. МАЦИЕВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ_РАСЧЁТ НАВЕДЁННЫХ ПОЛЕЙ В РЕЗОНАТОРЕ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ ABCI*	332
Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКОВ ИОНОВ В УСКОРИТЕЛЕ-ДРАЙВЕРЕ LINAC-100 ДЛЯ ПРОЕКТА DERISA	334
А.Р. КАРИМОВ, В.К. БОГДАНОВ, В.В. ДМИТРИЕВА_ДИНАМИКА ЭЛЕКТРО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ С ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ	336
А.М.БУЛЬГИН, А.Р.КАРИМОВ, В.И.ПЕРОВ_СВОБОДНАЯ ДИНАМИКА АЭРОЗОЛЕЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К РАСПРОСТРАНЕНИЮ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНЫХ ИНФЕКЦИЙ.....	338
И.А. ЮРИН, С.М. ПОЛОЗОВ, М.С. ДМИТРИЕВ_РАЗРАБОТКА КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ	340
А.А. МЕЛЬНИКОВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ ОСИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА ПОСРЕДСТВОМ СПИН-НАВИГАТОРНЫХ СОЛЕНОИДОВ В СПИН-ПРОЗРАЧНОМ КОЛЬЦЕ.....	342
Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, Г.О. БУЯНОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ (ИРПЗ) КАК СРЕДСТВО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ УГРОЗЕ ИЗ КОСМОСА	344
И.А. АШАНИН, С.М. ПОЛОЗОВ_ДИНАМИКА ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ-ИНЖЕКТОРЕ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СИБИРЬ-2».....	346
С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ_МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОЛЛАЙДЕРА NICA С ВЫСОКОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ.....	348
И.А. АШАНИН, С.М. ПОЛОЗОВ_ДИНАМИКА ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ-ИНЖЕКТОРЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ «СИЛА» (ИССИ-4)	350
Г.О. БУЯНОВ_ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАМОЖЕННОГО КОНТРОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ.....	352
А. А. МАЛЫШЕВ, П. А. ФЕДИН, В. С. СКАЧКОВ, А.В. ЗИЯТДИНОВА, А. В. КОЗЛОВ, Т. В. КУЛЕВОЙ_ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТА-СЕПАРАТОРА ДЛЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ПУЧКОВ.....	354

Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, Г.О. БУЯНОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ_СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МАЛОЙ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТЬЮ	356
Ю.Д. КЛЮЧЕВСКАЯ, С.М. ПОЛОЗОВ_ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЧ-ФОТОПУШКИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ-ИНЖЕКТОРА ПРОЕКТА ИССИ-4.....	358
Е.А. ВОЙНОЛОВИЧ, С.Д. СУПРУН, А.А. ЛЕПЕТЮХА ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В МОДУЛЯТОРЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК.....	360
М.А. ГОРБУНОВ, А.В. ИЛЬИНСКИЙ , Р.П. ПЛЕШАКОВА, В.Г. ЦЕЙТЛИН , А.Е. ШИКАНОВ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ___О СТАТИСТИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В УСТРОЙСТВАХ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА БАЗЕ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	362
М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН, Р.Е. НЕМЧЕНКО, С.М. ПОЛОЗОВ, А.В. БУТЕНКО, Е.М. СЫРЕСИН, Д.С. БЫЧЕНОК, С.А. МАКСИМЕНКО, В.Г. ЗАЛЕССКИЙ, В.С. ПЕТРАКОВСКИЙ, И.Л. ПОБОЛЬ, А.И. ПОКРОВСКИЙ, А.А. ШВЕДОВ, С.В. ЮРЕВИЧ ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПРОЕКТА НУКЛОТРОН-NICA.....	364
S. VILANISHVILI_PROPOSAL OF A CAVITY BPM FOR EUPRAXIA@SPARC_LAB PROJECT	366
Г.Б. ШАРКОВ, А.С. КУХАРЕНКО, А.В. САВЧУК, В.В. ГУДКОВ, Д.И. ИЩУК, А.Г. ИЛЮШИН, М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ЛАЛАЯН, М.А. ГУСАРОВА, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, Т.А. ЛОЗЕЕВА, В.Г. КУЗЬМИЧЕВ, Д.А. ЛЯКИН, А.Л. СИТНИКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ	368
УНИФИЦИРОВАННАЯ ЛИНЕЙКА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ 40, 81 И 162 МГЦ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЛЁГКИХ И ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ	368
В.М. БЕЛУГИН, А.Е. ВАСИЛЬЕВ, Н.Е. РОЗАНОВ_ПРИМЕНЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ЛАМПАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ370 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	371
Н.И. СКРИПКИН, А.В. ШМЕЛЕВ, А.И. ПРОНИКОВ КОМПЛЕКСИРОВАННЫЙ СВЧ-МОДУЛЬ С	

СИНХРОНИЗИРОВАННЫМИ МАГНЕТРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ	372
И.В. РЫБАКОВ, Л.В. КРАВЧУК, В.В. ПАРАМОНОВ, А.В. ФЕЩЕНКО ПРЕДЛОЖЕНИЕ НОРМАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ ВОДОРОДА	374
РИС. 2 ЭСКИЗ РЕЗОНАТОРА НА ОСНОВЕ СЕКЦИЙ CDS.	375
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ <u>ВАРИАЦИОННЫЕ</u> ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРИТЕЛЯ С СЕКЦИЯМИ НА СТОЯЧЕЙ И БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ.....	376
Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, М.А. ГУЗОВ, А.И. МАКАРОВ РАЗРАБОТКА УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ПОКФ НА РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЕ 81,25 МГц	378
Г.П. АВЕРЬЯНОВ, В.В. ДМИТРИЕВА, А.М. КОНЕВ, И.А. КУНОВ, Е.М. НОСОВА <u>ОЦЕНКА ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ</u> ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДАМИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	380
Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, В.Г. КУЗЬМИЧЕВ <u>ЭЦР-ИСТОЧНИК</u> ЛЕГКИХ ИОНОВ	382
К.Г.АРТАМОНОВ, М.С.ДМИТРИЕВ, М.И.ЖИГАЙЛОВА <u>МАГНИТНАЯ</u> СИСТЕМА С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц	384
А.В. ПРОКОПЕНКО, К.Д. СМИРНОВ <u>СИСТЕМЫ СВЧ ПИТАНИЯ</u> ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО- ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА	386
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ <u>СИСТЕМА ЭКСТРАКЦИИ И</u> ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ДЛЯ ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ .	388
А.Е. ШИКАНОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.Д.ВОВЧЕНКО, А.П. МЕЛЕХОВ, О.В. ДЕРЯБОЧКИН ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ	390
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ <u>ВОЛНОВОДНЫЙ</u> РАЗРЫВ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ ДЛЯ ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц.....	392
М.С. САРАТОВСКИХ, А.Ю. ОРЛОВ, С.В. БАРАБИН <u>СОЗДАНИЕ</u> ПРОТОТИПА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ.....	394

В.С. ДЮБКОВ, А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИИ	396
С.В. КУЦАЕВ, Р. АГУСТССОН, Р. БЕРРИ, С. БУШЕ, А.Ю. СМИРНОВ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЗАМЕНЫ РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ	398
Н.П. БОБЫРЬ, Е.Д. КАЗАКОВ, Д.И. КРУТИКОВ, А.А. КУРИЛО, М.Ю. ОРЛОВ, А.В. СПИЦЫН, М.Г. СТРИЖАКОВ_О ПРИМЕНЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК ПРИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ.....	399
С.П. ПОЛЯКОВА, Т.В. САВЕНКОВА, А.Р. КАРИМОВ Ю.С. ПАВЛОВ ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ, КАЧЕСТВА, ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ.....	402
А.А. ГОРЧАКОВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН, С.Е. ТОПОРКОВ РАЗРАБОТКА УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР Н – ТИПА	404
А.И. МАКАРОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, М.А. ГУЗОВ ОЦЕНКА ДОПУСКОВ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ И УСТАНОВКУ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ПОКФ НА ЧАСТОТЕ 81,25 МГЦ.	406
М.А. ГУЗОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, А.И. МАКАРОВ СИСТЕМА ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ПОКФ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ЧАСТОТЕ 81,25 МГЦ	408
А.А. ГОРЧАКОВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН, С.Е. ТОПОРКОВ КОМПЕНСАЦИЯ ДИПОЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ В СТРУКТУРАХ Н – ТИПА.....	410
М.М. БУЛГАЧЕВА, М.А. ГУСАРОВА_РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ УРОВНЕЙ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В ОДНОАЗОРНЫХ ГРУППИРОВАТЕЛЯХ НА ЧАСТОТУ 81,25 МГЦ.....	412
Р.А. ЗБРУЕВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН_СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПЕРИОДИЧЕСКИХ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР ДИАПАЗОНОВ S, C И X.	414
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ_СИСТЕМА ЭКСТРАЦИИ ПУЧКА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ЛЕГКИХ ИОНОВ	417

Н.Ю. САМАРОКОВ, Я.В. ШАШКОВ_РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ВОЛН ВЫСШЕГО ТИПА В УСКОРЯЮЩЕМ РЕЗОНАТОРЕ НА 350 МГЦ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫВОДА МОЩНОСТИ	419
К.И. КОЗЛОВСКИЙ, О.В. ДЕРЯБОЧКИН, А.П. МЕЛЕХОВ, А.Е. ШИКАНОВ, Е.Д. ВОВЧЕНКО_ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	421
К.Г.АРТАМОНОВ, М.С.ДМИТРИЕВ, М.И.ЖИГАЙЛОВА, В.И. РАЩИКОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ	423
М.С. ДМИТРИЕВ, А.С. КРАСНОВ_ПЛАЗМЕННАЯ КАМЕРА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ЭЦР ИСТОЧНИКА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГЦ.....	425
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ_РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОГО СОГЛАСОВАТЕЛЯ НА ЧАСТОТУ 2,46 ГГЦ.....	427
Н.М. КРИСТИ, А.И. МАРЧЕНКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, П.А. ФЕДИН, К.Е.ПРЯНИШНИКОВ_РАЗРАБОТКА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ВТОРОГО ИНЖЕКТОРА ИОНОВ H^+ He^+	429
А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН_МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ	430
Н.Н. БОГАЧЕВА, П.А. ФЕДИН, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В МИШЕННОЙ КАМЕРЕ	432
П.А. ФЕДИН, В.К. СЕМЯЧКИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Р.П. КУЙБИДА, Т.В. КУЛЕВОЙ_ПРОЕКТ МИШЕННОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОБЛУЧЕНИЙ ОБРАЗЦОВ ДВУМЯ ПУЧКАМИ ИОНОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ... ..	434
Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А. П. СКРИПНИК, А.Е. ШИКАНОВ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ_ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЯ КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ.....	436
М.И. ЛИСОВСКИЙ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.А. ШИКАНОВ МАЛОГАБАРИТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ КВАНТОВ, ТЕРАГЕРЦОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УСКОРЕНИЯ ДЕЙТРОНОВ	438

**Секция ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ 440**

- А.А. АЛТУХОВ, К.В. ЗАХАРЧЕНКО, Р.Ф. ИБРАГИМОВ,
В.А. КОЛЮБИН, С.А. ЛЬВОВ, Е.М. ТЮРИН_БОРТОВОЙ МОНИТОР
КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ
ДЕТЕКТОРОВ..... 441
- П.Г. ВАСИЛЬЕВА, С.П. МАСЛЕННИКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ
ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
СЦИНТИЛЛЯТОРА ЗА СЧЕТ ФРАГМЕНТИРОВАННОСТИ
ДЕТЕКТОРА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WLS-СВЕТОВОДОВ..... 443
- С.В. ГАВРИШ, Д.Н. КУГУШЕВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, Р.М. УШАКОВ
ИНДИКАТРИСА ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА УФ
ИЗЛУЧЕНИЯ С U- ОБРАЗНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПЛАЗМЕННОГО
КАНАЛА..... 445
- С.В. ГАВРИШ, В.М. ГРАДОВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, С.В. ПУЧНИНА
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ В САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧКАХ ИМПУЛЬСНЫХ
ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП..... 447
- А.П. ДЕНИСЕНКО, Я.А. КОКОРЕВ, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА
ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ НАБОРА
АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ..... 449
- А.Б. ЗАКИРОВ, В.М. САБЛИН_МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ
ПУШКИ КЛИСТРОНА С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ
ГОТОВНОСТИ ИЗДЕЛИЯ 451
- Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.Э. ЛУПАРЬ, И.Д. КОЛБИН_ЭЛЕМЕНТНЫЙ
АНАЛИЗ СОСТАВА ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРОННО-
РАДИАЦИОННОГО МЕТОДА..... 454
- А.С. ИППОЛИТОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАТОДНО-СЕТОЧНЫХ УЗЛОВ В
ИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОННЫХ ТРУБОК С ОКСИДНЫМИ
КАТОДАМИ..... 456
- И.А. КАНЬШИН_ТРАЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ КОРПУСКУЛЯРНОГО
ПОТОКА, ЭКСТРАГИРУЕМОГО ИЗ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА
НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ 458
- И.М. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ_ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИОННОГО
ИСТОЧНИКА ПЕННИНГА НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ 460

И.С. МАСЛЕННИКОВА, Г.И. ЗЕБРЕВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ ИСПЫТАНИЯ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ	462
Д.А. МЯНДИН, Е.В. РЯБЕВА, И.В. УРУПА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ_МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ.....	464
М.В. ПРОКУРОНОВ, В.Д. СЕВАСТЬЯНОВ, О.И. ФОМИН, Р.М. ШИБАЕВ, А.В ЯНУШЕВИЧ_ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТРОСКОПОВ С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СМЕШАННОГО БЫСТРОГО НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ.....	466
С.А. РАДЖАПОВ, Ф.Г.МУЛЛАГАЛИЕВА. Б.С. РАДЖАПОВ, М.А.ЗУФАРОВ_РАЗРАБОТКА РАДИОМЕТРА АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЯ	468
М.Н. САВЕЛЬЕВ, С.В. КОЛЕСНИКОВ, Н.В. БОЙКО, С.Г. РУДАКОВ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ МНОГОМОДУЛЬНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ	470
Д.И. САВИН, Е.В. РЯБЕВА, И.В. УРУПА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО ПЛАСТМАССОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА EJ-276	472
Д.И. САВИН, Е.В. РЯБЕВА, И.В. УРУПА_КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ПЛАСТМАССОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА EJ-276 С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА D-T НЕЙТРОНОВ	474
Д.И. САВИН, Е.В. РЯБЕВА, И.В. УРУПА_ОЦЕНКА КАЧЕСТВА N-Г РАЗДЕЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО ПЛАСТМАССОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА EJ-276	476
О.Г. СТРУЧЕНКОВА, С.П. МАСЛЕННИКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ В ИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ ПЕННИНГА	478

Секция

Лазерная физика и лазерные технологии

Руководитель секции	– к.ф.-м.н., доцент Петровский Виктор Николаевич
Секретарь секции	– к.ф.-м.н., Губский Константин Леонидович

E-mail: tvkazieva@mephi.ru

Г.П. АВЕРЬЯНОВ¹, В.В. ДМИТРИЕВА¹, А.М. КОНЕВ¹, И.А.
КУНОВ¹, Е.М. НОСОВА²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

²Московский государственный технический университет гражданской авиации
(МГТУ ГА), Москва, Россия

ОЦЕНКА ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДАМИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рассматривается проблема оценки паразитных параметров мощных импульсных устройств с распределенными параметрами на основе классификации форм выходных сигналов методами машинного обучения и распознавания образов. Рассмотрено применение линейной регрессии, модель «Случайный лес», метод k-ближайших соседей, одномерная модель сверточной нейронной сети. Дается сравнение производительности каждого подхода, а также варианты их совместного использования.

G.P. AVAVERYANOV¹, V.V. DMITRIEVA¹,
A. M. KONEV¹, I.A. KUNOV¹, E. M. NOSOVA²

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

²*The Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA), Russia*

ESTIMATION THE PARASITIC PARAMETERS OF POWER PULSED DEVICES BY IMAGE RECOGNITION AND MACHINE LEARNING METHODS

The article reviews the problem of detecting parasitic parameters based on the form classification of the output signals of based on machine learning methods and pattern recognition in powerful pulse devices with distributed parameters. Considered the linear regression methods, the "Random Forest" model, the k-nearest neighbors' algorithm, a one-dimensional convolutional neural network model. Comparison of the performance of each approach is given, as well as options for sharing these methods.

Устройства формирования мощных высоковольтных импульсов малой длительности, имеют широкий круг применения в ускорителях и установках мегасайенс класса. Моделирование этих устройств базируется на системах из компонентных и топологических уравнений, одновременно учитывающих элементы с сосредоточенными и

распределенными параметрами. Прохождение импульса в сегментах линии описывается с системой телеграфных уравнений, и решается через рекуррентную конечно-разностную схему (1).

$$\begin{cases} u_{k+1}(t + T_k) + \rho_k i_{k+1}(t + T_k) = (1 - \rho_k g_k) u_k(t) + (\rho_k - r_k) i_k(t) \\ u_k(t + T_k) - \rho_k i_k(t + T_k) = (1 - \rho_k g_k) u_{k+1}(t) + (\rho_k - r_k) i_{k+1}(t) \end{cases} \quad (1)$$

здесь величина тока $-i_{k+1}$ и напряжения $-u_{k+1}$ в секции с номером $(k + 1)$ определяются через величину тока $-i_k$ и напряжения $-u_k$, электрическую длину $-T_k$, сопротивление $-r_k$ и проводимость $-g_k$, вычисленные для предыдущего сегмента линии (с номером k) [1].

Успешное моделирование переходных процессов в схемах формирователей импульсов позволило перейти к задаче обратного моделирования. В этом случае данными являются осциллограммы, показывающие напряжение на нагрузке длинной линии, и могут быть получены сначала на симуляторах, на которых результат легко проверить, а затем и на реальных установках. В ходе работы была оценена работа каждой модели по метрике среднего абсолютного отклонения

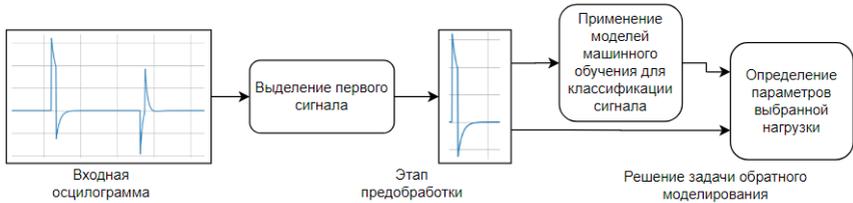


Рис. 1. Схема процесса решения задачи обратного моделирования

Среди рассмотренных методов классификации и регрессии модель сверточной нейронной сети показала наилучший результат. [2]

Список литературы

1. Averyanov G P et al. 2014 (in Russian) Virtual electrophysics laboratories: New generation (Cybernetics and Physics, Vol. 3, No. 4) pp 153 – 156
2. Hastie, T., Tibshirani R., Friedman J. “The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction” 2009

Г.А. МЕЕРОВИЧ^{1,2}, Е.В. АХЛЮСТИНА², И.Д.
РОМАНИШКИН¹,
Е.А. КОГАН³, М.Г. СТРАХОВСКАЯ⁴, К.Г. ЛИНЬКОВ¹,
С.А. ГОНЧУКОВ², В.Б. ЛОЩЕНОВ^{1,2}

*¹Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук,
²НИЯУ МИФИ
³МГМУ им. И.М. Сеченова,
⁴МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТА ПРИ ФОТОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В ТОНКИХ СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ СЛОЯХ

В работе оценена доля энергии света, поглощаемого в тонком слое растворов фотосенсибилизаторов, которая зависит от экстинкции фотосенсибилизатора, его концентрации, толщины слоя, длины волны и формы спектра излучения. В зависимости от типа источника облучения изменяется эффективность фотодинамического воздействия.

G.A. MEEROVICH^{1,2}, E.V. AKHLYUSTINA²,
I.D. ROMANISHKIN¹, E.A. KOGAN³, M.G.
STRAKHOVSKAYA⁴, K.G. LINKOV¹, S.A. GONCHUKOV², V.B.
LOSCHENOV^{1,2}

*¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
²NRNU MEPhI, ³Sechenov FMSMU, ⁴Lomonosov MSU, Moscow, Russia*

THE EFFICIENCY OF USING LIGHT IN PHOTODYNAMIC TREATMENT OF THIN SENSITIZED LAYERS

In the work, we evaluate the fraction of light energy absorbed in a thin layer of photosensitizer solutions, which depends on the photosensitizer extinction, its concentration, layer thickness, the shape and wavelength of the light source emission spectrum. The efficiency of photodynamic action varies depending on the type of radiation source.

Для решения многих задач фотодинамического воздействия (ФВ) необходимо возбуждать фотосенсибилизаторы (ФС) в тонких (<5 мм) слоях сенсibiliзированных композиций с биоклетками, например, при фотодинамической инактивации патогенов на разных поверхностях и т.д.

Доля η энергии света, поглощаемого в слое толщиной L , сенсibilизированном ФС с экстинкцией ε и молярной концентрацией c , может быть оценена:

$$\eta = 1 - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \times e^{-2.3 D(\lambda)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda}$$

$$D(\lambda) = \varepsilon A(\lambda) c L$$

Здесь, λ_1 и λ_2 — границы спектрального диапазона, в котором лежит спектр источника излучения, $A(\lambda)$ — нормированный спектральный контур полосы поглощения ФС, $I(\lambda)$ — нормированный спектр излучения источника (нормировка производится путем деления спектральной интенсивности излучения на его интегральную интенсивность).

Оценки по этой формуле для ФС на основе: метиленового синего ($C_{16}H_{18}ClN_3S$), холосенса ($ZnPcChol_8$), синтетического бактериохлорина ($(3-PyBrE)_4VCBr_4$) — показывают, что при облучении растворов ФС концентраций 1-10 мкМ значительная часть энергии света не поглощается, а выходит за пределы сенсibilизированного слоя. Наибольшие значения η достигаются при монохроматическом возбуждении. При использовании СИД достигаются близкие к ним значения η .

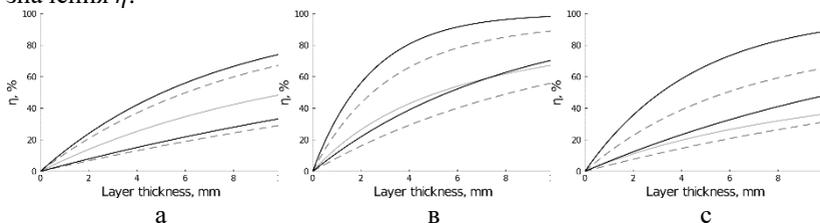


Рис.1. Зависимость доли поглощенной световой энергии от толщины сенсibilизированного слоя (А- $C_{16}H_{18}ClN_3S$, В- $ZnPcChol_8$; С- $(3-PyBrE)_4VCBr_4$): 1-лазер с длиной волны излучения, совпадающей с длиной волны максимума поглощения ФС ($c = 10$ мкМ); 2 – СИД ($c = 10$ мкМ); 3- широкополосный источник излучения с шириной полосы 100 нм ($c = 10$ мкМ); 4 - лазер ($c = 3$ мкМ); 5 – СИД ($c =$ ФС 3 мкМ)

При использовании широкополосных источников света с пропускающими полосовыми фильтрами потери излучения значительно больше. Значения η для таких источников могут быть в 1,5–2 раза ниже значений η для возбуждения лазером или СИД, они не превышает 43% даже при облучении ФС с высокой ε ($ZnPcChol_8$) с $c=10$ мкМ, а для ФС с меньшей ε ($C_{16}H_{18}ClN_3S$, хлоринов) составляет только

20-25% (при 3 мкМ эти значения уменьшаются, до 13 и 7%, соответственно).

Работа Е.В. Ахлюстиной, Е.А. Коган, С.А. Гончукова выполнена при поддержке РФФИ № 20-52-18008, Работа Г.А. Мееровича, М.Г. Страховской выполнена при поддержке РФФИ № [20-04-60084](#)

*М.Р. БУТАЕВ^{1,2}, В.И. КОЗЛОВСКИЙ^{1,2}, Я.К. СКАСЫРСКИЙ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия ²Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИСКОВЫЙ ЛАЗЕР С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 497 НМ

Исследован полупроводниковый дисковый лазер с оптической накачкой на основе гетероструктуры, содержащей 10 сдвоенных квантовых ям (КЯ) CdS/ZnSe с разрывами зон второго типа.

M.R. BUTAEV^{1,2}, V.I. KOZLOVSKY^{1,2}, Y.K. SKASYRSKY²

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

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

SEMICONDUCTOR DISK LASER WITH A RADIATION WAVELENGTH OF 497 NM

An optically pumped semiconductor disk laser based on a heterostructure containing ten CdS/ZnSe coupled quantum wells with type-II band offsets is studied.

Актуальность разработки полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ) связана с возможностью генерирования в них высокой мощности при качестве пучка с дифракционной расходимостью в существенно широком спектральном диапазоне. Данный тип лазеров интенсивно развиваются в последние 10 лет многими лабораториями развитых стран. На их основе реализуются когерентные источники ультрафиолетового и видимого диапазона, оптические параметрические генераторы среднего ИК диапазона, терагерцовые когерентные излучатели, а также генераторы фемтосекундных импульсов с высокой частотой повторения [1]. Благодаря этому данный тип лазеров перспективен для многочисленных применений в разных областях науки и техники, в медицине, спектроскопии, лазерной локации, в проекционном телевидении и дисплейных технологиях, для продольной накачки длинных лазерных сред.

В данной работе мы сообщаем о реализации первого ПДЛ с оптической накачкой, излучающего на основной частоте в сине-зеленой области спектра. С этой целью методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений была выращена наноразмерная гетероструктура, содержащая 10 сдвоенных квантовых ям CdS/ZnSe (ZnSe (4 нм)/CdS (2 нм)/ZnSe (2 нм)/CdS (2 нм)/ZnSe (4 нм)), разделенных барьерными слоями ZnSSe (86 нм). Из данной

гетероструктуры был изготовлен активный элемент ПДЛ. В результате при комнатной температуре и продольной накачке излучением импульсно-периодического N_2 -лазера достигнута пиковая мощность излучения полупроводникового дискового лазера 0.75 Вт на длине волны 496.5 нм (рис.1) при длительности импульса 3 нс и частоте следования 100 Гц. Дифференциальный коэффициент полезного действия (КПД) составил 2.7%. При длине резонатора 1.1 мм полный угол расходимости изменялся от 5 мрад вблизи порога генерации до 15 мрад при максимальной мощности накачки.

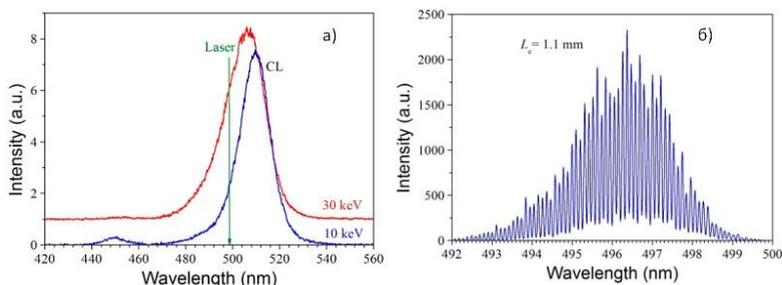


Рис. 1. Спектр катодолуминесценции исходной структуры при энергии электронов 10 и 30 кэВ (а) и спектр генерации лазера при длине резонатора $L_c = 1.1$ мм (б)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90022.

Список литературы

1. O.G. Okhotnikov, Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology. (Weinheim: Wiley-VCH, 2010).

Я.В. ГРУДЦЫН¹, И.О. КИНЯЕВСКИЙ¹, А.В. КОРИБУТ¹,
Л. В. СЕЛЕЗНЁВ¹, Ю.А. ГЕРАСИМОВА^{1,2},
А.А. РОГАШЕВСКИЙ¹

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

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВНУТРИИМПУЛЬСНАЯ РАЗНОСТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТЫ В СРЕДНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ (8.5-13.5 мкм) ПОСЛЕ УШИРЕНИЯ СПЕКТРА СО СМЕЩЕНИЕМ В КРАСНУЮ ЧАСТЬ В ПОСТФИЛАМЕНТАЦИОННОМ КАНАЛЕ

Приведены результаты экспериментов по использованию широкополосного (720-840 нм) спектра, сформированного излучением Ti:Sa лазера в постфиламентационном канале, для внутриимпульсной генерации разностной частоты в нелинейном кристалле LiGaS₂. Получена генерация когерентного излучения со спектром в среднем инфракрасном диапазоне (8.5-13.5 мкм по уровню e^{-2} , отвечает спектрально-ограниченному импульсу с длительностью 47 фс или 1.3 периода на длине волны 10.9 мкм).

YA. V. GRUDTSYN¹, I.O. KINYAEVSKIY¹, A. V. KORIBUT¹,
L. V. SELEZNEV¹, YU. A. GERASIMOVA^{1,2}, A. A.
ROGASHEVSKIY¹

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

²*National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)*

BROADBAND (8.5-13.5 μm) INTRA-PULSE DIFFERENT FREQUENCY GENERATION AFTER RED SHIFT IN POST- FILAMENT CHANNEL

In the post-filament channel propagation regime of Ti:Sapphire laser pulse redshifted SPM-like spectrum in the range from 720 nm to 840 nm has been generated. Using this source for intrapulse different frequency generation in LiGaS₂ we experimentally obtained mid-infrared coherent radiation with spectrum from 8.5 μm to 13.5 μm at the e^{-2} level (corresponds to 47 fs of transform limited pulse duration or 1.3 period at 10.9 μm). 1132 x 849

Источники ультракоротких импульсов в среднем ИК-диапазоне широко применяются в измерениях с высоким временным разрешением [1], в спектроскопии, в т.ч. для медицинских целей [2], в изучении быстрых химических реакций [3].

Одним из способов получения когерентного излучения в среднем ИК-диапазоне является внутриимпульсная генерация разностной частоты (ГРЧ). При этом не требуется использования двух отдельных пучков накачки, однако необходим спектр начального импульса шириной десятки нанометров. В данной работе предлагается уширение спектра в постфиламентационном канале. Спектр приобретает двухпиковую структуру, необходимую для эффективного разностного преобразования, при этом наблюдается его смещение в красную часть. Подобное смещение наблюдается в газонаполненных капиллярах [4].

Для разностного преобразования использовался кристалл LiGaS_2 с широкой полосой фазового синхронизма в области длин волн выше 8 мкм. Уширение (рис. 1), отвечающее генерации 10 мкм, наблюдалось для излучения на длине волны 744 нм при начальной энергии 1.8 мДж, длительности 100 фс и фокусировке сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 2.5 м.

Спектр инфракрасного излучения измерялся сканирующим спектрометром. В эксперименте получена генерация с коэффициентом преобразования около 10^{-4} , однако эффективность может быть существенно увеличена при компенсации дисперсии.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) (20-32-70015).

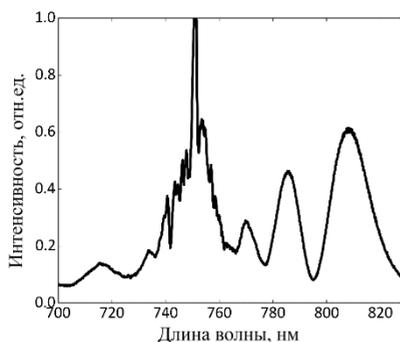


Рис. 1. Спектр центрального яркого пятна при энергии 1.8 мДж

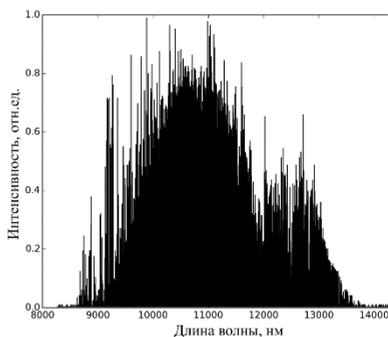


Рис. 2. Спектр разностной частоты

Список литературы

1. Stepanov E. A., Lanin A. A., et. al. // Sci. Rep. 2015. V.4. P.6670.
2. Seddon A. B. // 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). 2014. P.1.
3. Bakker H. J., Skinner J.L. // Chem. Rev. 2010. V.110. P.1498.
4. Carpeggiani P. A., Coccia G., et. al. // *Optica* 2020, V.7. P.1349.

В.Е. ГРИШКОВ¹, С.А. УРЮПИН^{1,2}

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

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

ГЕНЕРАЦИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРЕ ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛ, НА КОТОРУЮ ВОЗДЕЙСТВУЕТ СФОКУСИРОВАННЫЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ИМПУЛЬС

Исследована генерация терагерцового (ТГц) излучения при пондеромоторном воздействии фемтосекундного лазерного импульса на слой легированного полупроводника, нанесенный на металлическую поверхность. В полупроводниках, прозрачных для ТГц излучения, наблюдается пик в спектре излучения на плазменной частоте электронов, что приводит к относительному увеличению полной энергии и проявляется в осцилляциях генерируемого поля после выключения импульса. Оптимальные условия генерации реализуются тогда, когда размер фокусного пятна сравним с длиной импульса и глубиной скин-слоя. Если на удвоенной толщине полупроводника укладывается нечетное количество полуволн высокочастотного излучения, эффективность генерации резко возрастает. В частности, для GaAs и GaSb эффективность увеличивается более чем на два порядка.

V.E. GRISHKOV¹, S.A. URYUPIN^{1,2}

¹*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS), Moscow, Russia*

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

GENERATION OF THZ RADIATION IN SEMICONDUCTOR-METAL NANOSTRUCTURE IRRADIATED BY FOCUSED FEMTOSECOND PULSE

Generation of terahertz (THz) radiation under the ponderomotive action of a femtosecond laser pulse on a doped semiconductor layer deposited on a metal surface is investigated. In semiconductors transparent to THz radiation, there is a peak in the emission spectrum at the plasma electron frequency which leads to a relative increase in the total energy and manifests itself in oscillations of the magnetic field after the pulse is switched off. Optimal generation conditions are realized when the focal spot size is comparable to the pulse length and skin depth. If an odd number of half-waves of high-frequency radiation are stacked at doubled semiconductor thickness, the generation efficiency increases sharply. In particular, for GaAs and GaSb, the efficiency increases by more than two orders of magnitude.

Интерес к изучению генерации терагерцевого (ТГц) излучения в полупроводниках, взаимодействующих с фемтосекундными импульсами, обусловлен тем, что в них эффективность преобразования лазерного излучения в ТГц выше, чем в металлах. В условиях сильного легирования отклик полупроводника на воздействие фемтосекундного импульса можно рассматривать также как отклик металла [1]. Вместе с тем, из-за того, что плотность электронов в полупроводнике на несколько порядков меньше, чем в металле, возникают более выгодные условия для преобразования лазерного излучения в ТГц. Во-первых, лазерное излучение проникает в полупроводник на расстояния много большие, чем в металл, а, во-вторых, ТГц излучение более эффективно выводится из полупроводника, если плазменная частота меньше частоты генерируемого излучения.

Принимая во внимание эти общие положения, нами развита теория генерации ТГц излучения при воздействии фемтосекундного импульса сфокусированного излучения на легированный полупроводник с заданной плотностью электронов. Рассмотрены условия, когда слой полупроводника находится в контакте с сильно отражающим металлом. В этих условиях можно значительно увеличить эффективность генерации из-за интерференции падающего и отраженного лазерного излучения в полупроводнике [2]. В полупроводниках, прозрачных для ТГц излучения, на стадии выключения лазерного импульса имеются осцилляции магнитного поля на плазменной частоте электронов. Изучен спектральный состав излучения. В прозрачных полупроводниках в спектре излучения присутствует ярко выраженный пик на плазменной частоте электронов. При больших частотах столкновений электронов этот пик сильно уширен. Вклад в энергию ТГц излучения от частот близких к плазменной частоте наиболее ярко проявляется тогда, когда обратная длительность лазерного импульса и плазменная частота сравнимы по величине. Тогда, когда на удвоенной толщине полупроводника укладывается нечетное число длин полуволн лазерного излучения генерация резко возрастает. Для GaAs и GaSb происходит относительное увеличение полной энергии более чем на два порядка.

Список литературы

1. Grishkov V.E., Uryupin S.A. // J. of Appl. Phys. 2020. Vol. 128, P. 203102.
2. Ramakrishnan G., Ramanandan G.K.P., Adam A. J. L., Xu M., Kumar N., R. Hendrikx W.A., Planken P.C.M. // Opt. Expr. 2013 Vol. 21, P. 16784.

А.А. ИОНИН¹, И.О. КИНЯЕВСКИЙ¹, Ю.М. КЛИМАЧЕВ¹,
Д.А. КОМАРОВ^{1,2}, А.Ю. КОЗЛОВ¹, О.А. РУЛЕВ¹, Д.В.
СЕНИЦЫН¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ ИЗЛУЧЕНИЯ СО-ЛАЗЕРА ПРИ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ В НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ ZnGeP₂

Исследованы энергетические характеристики излучения основных и суммарных частот СО-лазера с модуляцией добротности резонатора при внутрирезонаторном преобразовании в нелинейном кристалле ZnGeP₂.

A.A. IONIN¹, I.O. KINYAEVSKY¹, Yu.M. KLIMACHEV¹,
D.A. KOMAROV^{1,2}, A.Yu. KOZLOV¹, O.A. RULEV¹, D.V.
SINITSYN¹

¹P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

²National Research Nuclear University MEPHI, Moscow

SUM FREQUENCY GENERATION OF CO LASER RADIATION AT INTRACAVITY CONVERSION IN NONLINEAR CRYSTAL ZnGeP₂

Energetic characteristics of fundamental and sum frequencies radiation of Q-switched CO-laser at intracavity conversion in a nonlinear crystal ZnGeP₂ were investigated.

В данной работе экспериментально исследовалась внутрирезонаторная генерация суммарных частот СО-лазера с ВЧ накачкой и модуляцией добротности резонатора (МДР) в нелинейном кристалле ZnGeP₂.

Основой для экспериментального стенда являлся многочастотный щелевой СО-лазер с ВЧ накачкой и МДР, в отличие от описанного в работе [1], имеющий буферный объем камеры 30 л и размер пустотелых медных электродов 420x25 мм². Межэлектродный промежуток составлял 4 мм, а внутренние поверхности электродов имели золотое напыление. Для охлаждения активной среды через внутренние полости электродов прокачивался жидкий азот. Накачка активной среды осуществлялась ВЧ генератором Cesar 4020 (Advanced Energy Inc.), генерирующим импульсы прямоугольной формы. Мощность ВЧ

накачки ~ 1 кВт. Длительность импульса накачки 700 мкс, время задержки включения добротности резонатора ~ 100 мкс после окончания импульса накачки. Эксперименты проводились при давлении 34 мБар газовой смеси $\text{CO}:\text{O}_2:\text{He}=3:1:31$.

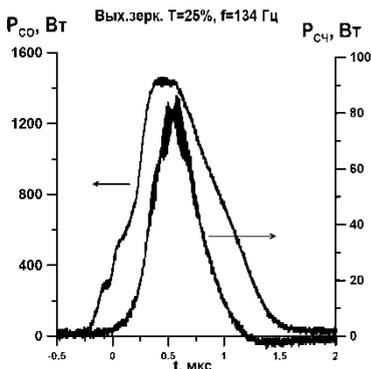


Рис. 1. Форма импульсов основных (P_{CO}) и суммарных ($P_{\text{Сн}}$) частот

В качестве выходного зеркала использовались как сам нелинейный кристалл ZnGeP_2 , так и добавленное к нему одно из диэлектрических зеркал, с коэффициентом пропускания для основной частоты $T=50\%$ (M_2), $T=25\%$ (M_3), либо $T=10\%$ (M_4). Частота модуляции резонатора составляла ~ 135 Гц.

На рис. 1 представлены формы импульсов, полученных с использованием выходного зеркала M_3 . Пиковая мощность суммарных частот составила ~ 80 Вт, основной частоты ~ 1400 Вт.

Во всех четырех конфигурациях резонатора спектр основных частот лежал в диапазоне 4.9 - 7.0 мкм, а спектр суммарных - 2.5 - 2.9 мкм. На рис. 2 представлены спектры основных и суммарных частот CO -лазера, откалиброванных на пиковую мощность, в конфигурации резонатора с зеркалом M_3 .

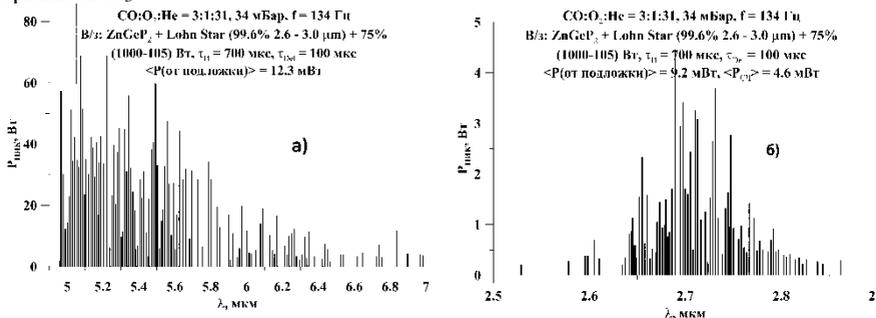


Рис. 2. Спектры излучения основных (а) и суммарных (б) частот

Максимальный коэффициент преобразования, определяемый как отношение средних мощностей излучения суммарных и основных частот CO -лазера внутри резонатора, был получен в схеме с зеркалом M_4 и составил $\sim 2.2\%$. Доля мощности излучения суммарных частот на выходе из резонатора достигала при этом 12.7% .

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 16-19-10619).

Список литературы

1. Ionin A.A. et al. // Optics and Laser Technology. 2019. Vol. 115. P. 205-209.

О.В. РОЗОВА¹, В.А. СТЕПАНОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Обнинский институт атомной энергетики (филиал) "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Обнинск, Россия

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ КЛЕТОЧНЫХ КУЛЬТУР НЕК-293

Проведено сравнение влияния импульсного и непрерывного низкоинтенсивного ИК-облучения на клеточные культуры НЕК-293. Экспериментально показано, что после импульсного воздействия увеличивается оптический контраст границ клеток. Это связано со стимулированием периодических микродеформаций клеточных мембран.

O.V. ROZOVA¹, V.A. STEPANOV²

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

²Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering "National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Obninsk, Russia

THE EFFECT OF PULSED AND CONTINUOUS LOW-INTENSITY IR-RADIATION ON MORPHOLOGY OF CELL CULTURES HEK-293

The effect of pulsed and continuous low-intensity IR-irradiation on cell cultures HEK-293 was compared. It is experimentally shown that the optical contrast between cell boundaries increases after pulsed irradiation. This is due to the stimulation of periodic microdeformations of cell membranes.

В работах [1, 2] было установлено, что в условиях низкоинтенсивного импульсного лазерного облучения в ближнем ИК-диапазоне в биотканях возникает динамически неоднородное температурное поле с амплитудой до 10^{-2} - 10^{-1} К. Возникающие при этом периодические деформации клеточных мембран стимулируют микроциркуляцию и оказывают терапевтическое действие. Оптимальная частота импульсного воздействия определяется из соотношения:

$$\omega_{\max} = \frac{10^4}{d(\mu\text{m}) * (d^4(\mu\text{m}^4) + 10^2)^{1/4}},$$

где d – характерный размер структурных элементов биологических тканей. Варьируя частоту посылки лазерных импульсов, можно

оказывать селективное воздействие на биоткани с различной морфологией [3].

В данной работе было разработано облучательное устройство в ближнем ИК-диапазоне (длина волны – 0,89 мкм) с регулируемой длительностью импульса и скважностью. Воздействие излучения на клеточные культуры эмбриональной почки человека, трансформированные ДНК аденовируса типа (Ad5) (НЕК-293), проводилось в непрерывном и в импульсном режимах. Частота импульсного облучения выбиралась с учетом морфологии клеточной культуры, а длительность импульса соответствовала характерному времени установления осмотического давления на липидные мембраны (времени деформаций).

В результате проведенного исследования было обнаружено, что в отличие от непрерывного воздействия импульсное облучение приводит к увеличению контраста границ клеток, как изображено на рис. 1. Это связано с тем, что под действием импульсного излучения возникают периодические микродеформации клеточных мембран, которые стимулируют микроциркуляцию питательного раствора вокруг клеток. В клеточных колониях это проявляется в увеличении видимой толщины около или межклеточного заполненного жидкостью пространства. Также показано, что после облучения клетки могут приобретать правильную равноосную форму.

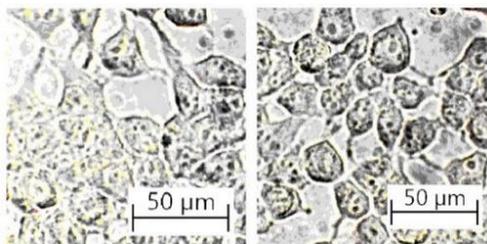


Рис. 1. Оптическое изображение клеточной культуры НЕК-293: исходной (слева), после воздействия импульсного ИК-излучения (справа)

Список литературы

1. Воронина О.Ю., Каплан М.А., Степанов В.А. Нерезонансный механизм биостимулирующего действия низкоинтенсивного лазерного излучения // Препринт ФЭИ/2094. - 1990, с. 26
2. Voronina O. Yu., Stepanov V.A. Laser radiation influence upon protein hydrosol and cell membrane states // 1992 International Conference on advanced and laser technologies (ALT 92) (Moscow, 1992). – 1992. – Part 5. – P. 122-123
3. Rozova O.V., Stepanov V.A. The physical modelling micro circulatory processes of biological tissues under the low-intensity IR-radiation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 1-4

Ю.К. СЕДОВА^{1,2}, С.А. МИНАЕВА², Е.В. ИВАНОВСКАЯ³,
Е.Д. Минаева^{1,2}, Н.В. МИНАЕВ², Т.С. ДЕМИНА⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»
РАН

³Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

⁴Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова
РАН

ПОЛИМЕРНЫЕ МИКРОЧАСТИЦЫ СОДЕРЖАЩИЕ НАНОЧАСТИЦЫ ГИДРОКСИАПАТИТА ДЛЯ БИОМЕДИЦИНЫ

Приведены результаты исследования биосовместимых полимерных микрочастиц, содержащих на поверхности и в объеме наночастицы гидроксиапатита, которые могут быть применимы для формирования искусственных конструкций - матриц для восстановления костной ткани в тканевой инженерии. Для различных типов микрочастиц с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния получены спектральные карты распределения гидроксиапатита в объеме образцов. Исследована зависимость распределения компонентов в составе частиц от условий их формирования.

Yu.K. SEDOVA^{1,2}, S.A. MINAEVA², E.V. IVANOVSKAYA³,
E.D. MINAEVA^{1,2}, N.V. MINAEV², T.S. DEMINA⁴

¹National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics
institute)

²Institute of Photon Technologies of FSRC "Crystallography and Photonics" RAS

³Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

⁴Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials RAS

POLYMERIC MICROPARTICLES FOR BIOMEDICINE CONTAINING HYDROXYAPATITE NANOPARTICLES

Biocompatible polymer microparticles containing on the surface and in the volume hydroxyapatite nanoparticles were fabricated for future formation of artificial scaffolds for bone tissue engineering and studied. Various types of microparticles were investigated in terms of distribution of hydroxyapatite nanoparticles over sample volume using Raman spectroscopy. Distribution of components within the composite microparticles was evaluated as a function of particle fabrication conditions.

Разработка новых биоматериалов является актуальной задачей. Биоматериалы востребованы в тканевой инженерии для формирования матриц, необходимых для восстановления поврежденных или

утраченных фрагментов биоткани. В частности, для стимуляции восстановления костной ткани востребованы материалы, содержащие наночастицы гидроксиапатита (нГА), так как он является основным неорганическим компонентом костной ткани. Микрочастицы на основе алифатических полиэфиров, содержащие нГА могут стать основой для дальнейшего формирования из них трехмерных конструкций, способствующих восстановлению костной ткани.

В работе исследовались гибридные микрочастицы, содержащие нГА, полученные методом испарения растворителя из эмульсии масло/вода с использованием раствора полилактида или поликапролактона в качестве дисперсной фазы. В дисперсную фазу или дисперсионную среду вводили нГА для получения микрочастиц со структурой матрица / наполнитель или ядро / оболочка, соответственно. Целью работы является исследование распределения нГА в микрочастицах в зависимости от условий их формирования и типа используемого полимера.

Размер и форму частиц исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Phenom ProX (рис. 1а). Микроскоп оснащен встроенным модулем для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) для элементного анализа. Подготовка срезов микрочастиц для анализа их внутренней структуры осуществлялась на ультрамикротоме Leica EM UC7 (рис. 1б). Исследование распределения компонентов внутри микрочастиц проводилось методом спектрального картирования на спектрометре комбинационного рассеяния Thermo Nicolet Almega XR Raman (рис. 1в).

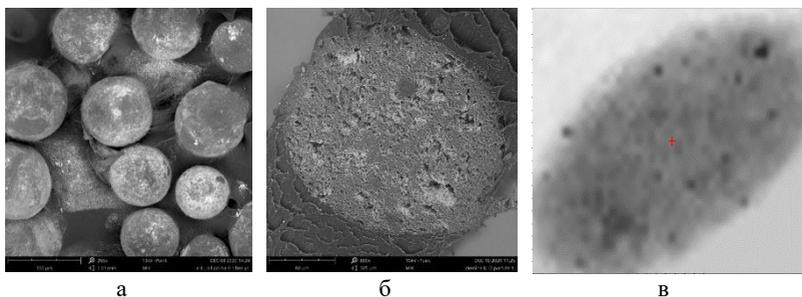


Рис. 1. Микрофотография полимерных микрочастиц (а), их среза (б), пример спектральной карты распределения нГА в микрочастице (чем больше нГА тем темнее область)

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части развития лазерных

аддитивных технологий и ИСПМ РАН в части исследования материалов из алифатических полиэфиров.

И.Н. ЗАВЕСТОВСКАЯ^{1,2}, В.А. ГУЩИН³, М.А.
НИКИФОРОВА³,
Л.И. РУССУ³, Е.А. ЧЕШЕВ¹, А.Л. КОРОМЫСЛОВ¹, И.М.
ТУПИЦЫН¹,

А.А. ФРОНЯ^{1,2}, М.С. ГРИГОРЬЕВА^{1,2}

*1 ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 ГСП-1 г.
Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53*

*2 ФГАОУ ВО Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31*

*3 ФГБУ Национальный исследовательский центр эпидемиологии и
микробиологии имени почетного академика Н.Ф. Гамалеи, 123098, Россия,
Москва, ул. Гамалеи, 18*

ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 370 НМ И 405 НМ НА ИНФИЦИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА КОРОНАВИРУСА

В работе представлены результаты экспериментального исследования воздействия ультрафиолетового излучения на бычий коронавирус. Проведена оценка влияния дозы облучения на инфицирующие свойства бычьего коронавируса.

ZAVESOVSKAYA I.N.^{1,2}, GUSHCHIN V.A.³, NIKIFOROVA
M.A.³, RUSSU L.I.³, CHESHEV E.A.¹, KOROMYSLOV A.L.¹,
TUPITSYN I.M.¹, FRONYA A.A.^{1,2}, GRIGORYEVA M.S.^{1,2}

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

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

*3 National Research Centre for Epidemiology and Microbiology named after the
Honorary Academician N. F. Gamaleya" of the Ministry of Health of the Russian
Federation, Moscow, Russia*

INFLUENCE OF UV RADIATION AT 370 NM AND 405 NM ON INFECTING PROPERTIES OF CORONAVIRUS

The experimental study results of the impact of ultraviolet radiation on bovine coronavirus had been presented in paper. An assessment of the effect of the radiation dose on the infecting properties of bovine coronavirus was carried out.

Одним из основных способов распространения вируса, наряду с передачей вируса воздушно-капельным путём при прямом контакте с зараженным человеком, является передача его от человека к человеку через контактные поверхности с последующим занесением в глаза, нос или рот. Наличие средств безопасной обработки окружающей среды с

целью деактивации вирусов и бактерий позволит в существенной степени предотвратить глобальный характер инфекционных заболеваний.

За последние пять лет группами ученых разных стран была продемонстрирована эффективность инактивации ряда патогенных агентов под воздействием ультрафиолетового излучения в различных диапазонах длин волн от 260 до 480 нм [1-2].

Продолжающаяся больше года пандемия, связанная с распространением вируса SARS-CoV-2 привела к активизации работ по поиску не только специфических средств профилактики и лечения, но и эффективных средств не специфической профилактики накопления и распространения инфекций в окружающей среде.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований воздействия ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн UVA, безопасном для человека, на инфицирующие свойства бычьего коронавируса при взаимодействии с клетками. Бычий вирус был выбран для исследований как модельный вирус с меньшей по сравнению с SARS-CoV-2 степенью патогенности. В качестве источника излучения были использованы светодиоды с длиной волны 370 нм и 405 нм. Доза облучения бычьего коронавируса варьировалась путем изменения длительности облучения.

Было показано, что для обеих длин волн УФ излучения наблюдается дозозависимое снижение инфекционного титра вируса.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-04-60292»

Список литературы

1. Paolo Luzzatto-Fegiz, Fernando Temprano-Coleto, François J. Peaudecerf, Julien R. Landel, Yangying Zhu, Julie A. McMurry. UVA radiation could be a significant contributor to sunlight inactivation of SARS-CoV-2. bioRxiv 2020.09.07.286666.
2. Yoram Gerchman, Hadas Mamane, Nehemya Friedman, Michal Mandelboim. UV-LED disinfection of Coronavirus: Wavelength effect. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, Volume 212, 2020, 112044, ISSN 1011-1344.

И.Н. БУРДОНСКИЙ¹, А.Г. ЛЕОНОВ¹, В.Н.ЮФА¹, А.М.
САДОВСКИЙ², А.Ю. ВОЛЧЕНКО³, Д.А. ПЕТУШКОВ³.

¹Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет) МФТИ, Москва, Россия

²ИКИ РАН Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНЫХ И КАМЕННЫХ МИШЕНЕЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЕ ВЕЩЕСТВО

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению критерия разрушения каменных и ледяных мишеней, имитирующих вещество астероидов и комет. Проведено исследование влияния низкой температуры мишени на величину критерия разрушения ледяных, и хондритовых (каменных) мишеней при воздействии на них лазерного излучения с интенсивностью от 10^8 до 10^{12} Вт/см². Для экспериментальных исследований использовался лазерный комплекс «Сатурн» [1]. Мишени облучались в двух температурных диапазонах: ледяные - минус 26 °С и минус 155 °С; хондритовые - +22 °С и минус 155 °С.

Эксперименты продемонстрировали, что при качественном изменении характера разрушения охлажденных до минус 155 С° мишеней, величина энергетического критерия разрушения E_L/M_m (Дж/г) практически не имела критического изменения.

I.N. BURDONSKY¹, A.G. LEONOV¹, V.N. YUFA¹,
A.M. SADOVSKY², A.YU. VOLCHENKO³, D.A. PETUSHKOV³

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

²IKI RAS Moscow, Russia

³National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

The results of experimental studies on determination of criterion of destruction of stone and ice targets simulating substance of asteroids and comets are presented. The effect of low temperature of the target on the value of the criterion of destruction of ice, and chondrite (stone) targets when exposed to laser radiation with intensity from 10^8 to 10^{12} W/cm² was investigated. For experimental studies, the Saturn laser complex was used [1]. The targets were irradiated in two temperature ranges: ice – from minus 26°C to minus 155°C; chondrite - from +22°C to minus 155°C.

Experiments demonstrated that with a qualitative change in the nature of destruction of cooled to minus 155°C targets, the value of the energy failure criterion E_L/M_m (J/g) practically did not have critical change.

В последние десятилетия предлагались различные подходы к предотвращению столкновения Земли с астероидами, однако, наиболее эффективным способом защиты, по-видимому, является разрушение астероидов и комет. Под разрушением следует понимать их фрагментацию на мелкие осколки, которые либо сгорают в атмосфере, либо вообще пролетают мимо Земли. Как показано в [1, 2, 9-11], одним из наиболее эффективных средств воздействия остается разрушение астероидов под действием контактного ядерного взрыва или с помощью импульсов мощного лазерного излучения. Необходимо отметить, что разброс “дневной” и “ночной” температур поверхности тела в космическом пространстве может меняться от плюс 150 °С до минус 180 °С в зависимости от его орбиты. Так, к примеру, “дневная” температура поверхности Луны составляет плюс 123 °С, а “ночная” минус 153 °С. Все это может привести к существенному изменению прочностных характеристик как каменных, так и ледяных мишеней.

Понятно, что необходимым требованием к любому из возможных способов воздействия на астероиды и кометы является гарантированное устранение угрозы катастрофы.

Как показано в [12] при температуре ледяной мишени порядка минус 20°C критерий ее разрушения лежит в диапазоне от 15 до 40 Дж/г. Критерий разрушения каменных (хондритовых) мишеней при низких температурах в этой работе не рассматривался.

Проведенное исследование динамики разрушения охлажденных ледяных и хондритовых мишеней при последовательном облучении их лазерными импульсами с заведомо меньшей энергией, чем E разрушения, выявило увеличение скорости распространения ударной волны в мишенях и образование откольного эффекта в ледяной мишени.

Список литературы

- 1 Бурдонский И.Н., Гольцов А.Ю., Леонов А.Г., Макаров К.Н., Тимофеев И.С., Юфа В.Н. // Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный синтез, том 36, выпуск 2. С. 8-18, 2013.
- 2 Аристова Е. Ю., Аушев А. А., Баранов В. К. и др. // ЖЭТФ, 2018, том 153, вып. 1. С. 1 – 16.
- 3 Зеленый Л.М., Есин В.И., Кокошин А.А. // [Наука в России](#), 2013, №4. С. 31–36.
- 4 Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортов В.Е. Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // Успехи физических наук. - 1984. – Т. 142, вып. 3. С. 395 – 434.
- 5 Gupta P. D., Tsui Y. Y., Popil R., et al. Ablation parameters in KrF laser/plasma interaction: An experimental study // Phys. Fluids. – 1987. – V. 30. –P. 179-185.

- 6 Batani D., Stabile H., Ravasio A., et al. Ablation pressure scaling at short laser wavelength // *Physical Review E*. – 2003. – V. 68. – P. 1-4.
- 7 Strand O. T. Goosman D. R. Martinez C. Whitworth T. L. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // *Rev. Sci. Instrum.* — 2006. — Т. 77, № 3. — С. 2545.
- 8 Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра.* – М.: Физматлит, 2013).
- 9 Phipps C. *AIP Conference Proceedings*, 1278, 502 (2010).
- 10 Thiry N., Vasile M. *Acta Astronautica*, 140, 293 (2017).
- 11 Бурдонский И.Н., Леонов А.Г., Макаров К.Н., Юфа В.Н. Экспериментальное исследование лазерной абляции каменных поликристаллических мишеней // *Квантовая электроника*, 2020, 50 (8), 763–769.
12. Белов И.А., Бельков С.А., Воронин А.Ю. и др. // *ЖЭТФ*, 2020, том 157, вып. 5. С. 928 – 935.

В.И. ЖУРАВЛЕВА¹, М.И. МАРКЕВИЧ², А.Б. КАМАЛОВ³,
Д.Ж. АСАНОВ³, А.М. ЧАПЛАНОВ²

¹Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

²Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

³Нукусский Государственный Педагогический Институт, Республика
Узбекистан

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

В данной работе представлено получение наночастиц никеля методом лазерной абляции в воде. Для формирования высокоинтенсивных импульсов воздействующего излучения на мишень Ni применялся частотный лазер LS 2137 на YAG:Nd. Методами просвечивающей электронной микроскопии исследованы наночастицы никеля, образовавшихся в результате лазерной абляции в жидкости. Рассмотрены механизмы образования наночастиц.

V.I. ZHURAVLEVA¹, M.I. MARKEVICH², A.B. KAMALOV³,
D.J. ASANOV³, A.M. CHAPLANOV²

¹Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of
Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Nukus State Pedagogical Institute, Republic of Uzbekistan

OBTAINING NICKEL NANOPARTICLES BY LASER ABLATION

This paper presents the preparation of nickel nanoparticles by laser ablation in water. To generate high-intensity pulses of irradiation on the Ni target, an LS 2137 frequency laser based on YAG: Nd was used. Nickel nanoparticles formed as a result of laser ablation in a liquid have been studied by transmission electron microscopy. The mechanisms of nanoparticle formation are considered.

В настоящее время во многих странах в качестве возобновляемых источников теплоснабжения распространение получили системы применения солнечной энергии. Солнце дает нашей планете огромное количество энергии, суммарное излучение на поверхность Земли достигает 152424×10^{13} кВт энергии, это в 20 тыс. раз превышает потребляемую энергию, вырабатываемую традиционными энергоносителями [1].

Лидерами в этом направлении являются Германия и Япония. Солнечные лучи приносят приблизительно по 1 кВт энергии на каждый

1 м² земной поверхности, однако в климатических условиях Центральной Европы используется незначительная доля этой энергии.

Солнечная тепловая энергетика – это нагревание рабочего тела, поглощающего солнечную энергию, распределение и использование ее в дальнейшем.

Для повышения эффективности поглощения солнечного излучения важно использовать адсорбенты в водном коллекторе. Для указанных целей нами предлагаются наночастицы никеля, которые позволяют осуществить плазмонный резонанс, что приведет к повышению эффективности поглощения солнечного излучения.

С уменьшением размера частиц и переходу к частицам, содержащим несколько сот или тысяч атомов, плотность электронных состояний изменяется, что обуславливает изменения их физико-химических свойств [1,2]. Увеличение кривизны поверхности наночастиц приводит к увеличению химического потенциала, и как следствие, происходит изменение каталитической и реакционной способности. Большая удельная поверхность наночастиц увеличивает адсорбционную способность.

Структура наночастиц, прежде всего, определяется методом их получения. Следует отметить, что метод лазерной абляции позволяет получать наночастицы с узким распределением по размеру частиц [2-6].

Лазерная абляция с поверхности мишени при помещении ее в жидкость позволяет получать коллоидные растворы.

Для формирования высокоинтенсивных импульсов воздействующего излучения на мишень Ni применялся частотный лазер LS 2137 на YAG:Nd. Параметры излучения: $E_{\text{им.}}=120$ мДж, $t_{\text{имп.}}=20$ нс, $V_{\text{следования}}=5$ Гц, $D_{\text{фокусировки}}=1$ мм. Для получения достаточного количества наночастиц никеля время воздействия на мишень составляет, как правило, 10-15 мин. и более.

Исследования, проведенные методами просвечивающей электронной микроскопии наночастиц никеля, образовавшихся в результате лазерной абляции в жидкости показали, что они могут быть как кристаллическими, так и аморфными. На рисунке 1 приведены наночастицы никеля, полученные лазерной абляцией в воде мишени из никеля. Полученные частицы имеют кристаллографическую огранку и являются кристаллическими.

Средний размер частиц составляет примерно 30-50 нм. На электронограмме полученной от наночастиц присутствуют кольца Дебая - Шеррена, принадлежащие никелю, причем кольца являются сильно текстурированными.

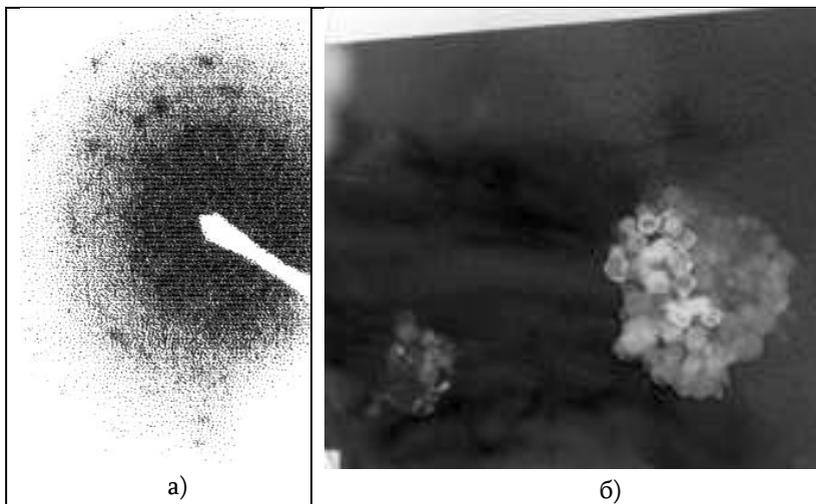


Рис. 1. Электронограмма и структура наночастиц никеля, полученных методом лазерной абляции. Увеличение 100000 раз а) электронограмма; б) структура

Таким образом, получены коллоидные растворы наночастиц никеля методом лазерной абляции мишени никеля в воду.

Показано, что возможно получение наноразмерных частиц никеля с эффективными размерами $\sim 30\text{-}50$ нм.

Установлено, что состав наночастиц полностью соответствует составу мишеней. Предложена гипотеза о двух механизмах образования зародышей: пар - кристалл и пар - жидкость кристалл, объясняющая образование наночастиц разной формы (квадрат, круг).

Список литературы

1. Г.Я. Бернер, М.Б. Раяк, М. Кинкер, Солнечная энергетика за рубежом. //Новости теплоснабжения.- 2009.- №5.- с.1-5.
2. Казилин, Е.Е. Исследование коллоидных растворов селена, созданных по лазерной технологии / Е.Е. Казилин, М.И. Маркевич, С.В. Конкин, А.М. Чапланов, Г.Э. Фолманис, Л.И. Иванов, Л.В. Коваленко// Перспективные материалы.- 2008.-№3.- С. 60-63.
3. В.С. Бураков, А.В. Буцень, П.Я. Мисаков, Е.А. Невар, М.И. Неделько, Н.А. Савастенко, Н.В. Тарасенко, М.И. Маркевич, А.М. Чапланов, Электроразрядный синтез наноразмерных структур оксидов и карбидов металлов в жидкостях 2007 г.- II Международная научно-техническая конференция.- Современные методы и технологии создания и обработки материалов.- Минск-С. 158-162.
4. Казилин Е.Е.,Маркевич М.И., Конкин С.В., Чапланов А.М., Фолманис Г.Э., Ковалевский Л.В., Янушкевич В.А. Исследование частиц коллоидного раствора селена в воде, полученных методом лазерной абляции // VII Международная конференция «Лазерная физика и оптические технологии».-2008.-Материалы конференции.- т.2- с.142-144.

5. Маркевич М.И., Бакаев А.Г., Стельмах В.Ф., Чапланов А.М., Е.Н. Щербакова
Магниторезонансные свойства магнито - реологической суспензии на основе глицерина и
частиц магнетита // Материалы.Технологии.Инструменты -2014.-№3.-37-39.

6. Макркевич М.И., Чапланов А.М., Журавлева В.И., Жигулин Д.В., Стельмах
В.Ф. Формирование коллоидных растворов кремния//Материалы и структура
современной электроники.-Материалы VIII Международной научной конференции.-
Минск,10-12 октября.-2018.-С.302-305

В.П. БИРЮКОВ

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

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ 34ХНЗМА НА ПАРАМЕТРЫ ЗОН ЗАКАЛКИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлены металлографические исследования дорожек закалки лучом лазера образцов стали 34ХНЗМА. С помощью полного факторного эксперимента установлено влияние режимов обработки на глубину и ширину зон закалки. Показано, что микротвердость изменяется в пределах 6870-7680 МПа при дефокусировке луча 135-155 мм, скорости перемещения луча 7-9 мм/с и мощности излучения 700-1000 Вт. Износостойкость поверхности трения с лазерной закалкой с шагом 5 мм повышается на 130 и 40% по сравнению с исходной и объемно закаленной сталью соответственно.

V. P. BIRYUKOV

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

INFLUENCE OF LASER HARDENING OF 34KhNi3MoA STEEL ON THE PARAMETERS OF QUENCHING ZONES AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS

Metallographic studies of the laser-beam quenching paths of 34KhNi3MoA steel samples are presented. The influence of the treatment modes on the depth and width of the quenching zones was established using a full factorial experiment. It is shown that the microhardness varies in the range of 6870-7680 MPa with a beam defocus of 135-155 mm, a beam travel speed of 7-9 mm/s, and a radiation power of 700-1000 W. The wear resistance of the friction surface with laser quenching in 5 mm increments is increased by 130 and 40% compared to the original and volumetrically quenched steel, respectively.

При производстве современных атомных электростанций (АЭС) применяются различные хромоникельмолибденовые и жаропрочные стали. Лазерное упрочнение локальных поверхностей трения стальных деталей, шеек валов, роторов, дисков паровых турбин, валов-шестерен, муфт, зубчатых колес значительно повышает их износостойкость [1,2]. Целями настоящей работы являются определения влияния режимов лазерного упрочнения на параметры зон закалки стали 34ХНМА и ее трибологических характеристик.

Лазерную обработку образцов стали 34ХНЗМА с размерами 12×20×70 мм выполняли на технологическом комплексе ИМАШ РАН. В качестве варьируемых параметров были выбраны мощность излучения $P=700-1000$ Вт, скорость обработки $V=7-9$ мм/с и дефокусировка луча $L=135-155$ мм. Трибологические испытания проводили по схеме плоскость (термоупрочненный лазерным лучом образец) – втулка, сталь 40ХНМА (49-53 HRC). Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,5–3,5 м/с и 1–5 МПа соответственно. На рис. 1 представлены микрошлифы зон закалки при обработке расфокусированным и колеблющимся с частотой 226Гц лучом при мощности излучения 1000 Вт, скорости перемещения образца 7 мм/с и дефокусировке луча 155 мм. Производительность лазерной закалки колеблющимся лучом повышается в 1,6-2,1 раза в зависимости от режимов обработки

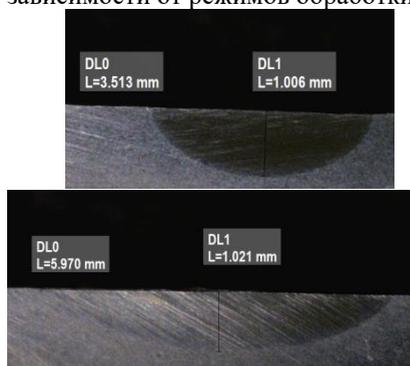


Рис. 1. Микрошлифы зон закалки стали 34ХНЗМА (а) расфокусированным лучом, (б) сканирующим лучом: $P=1000$ Вт, $V=7$ мм/с, $L=155$ мм

При дефокусировке луча на 135-155 мм увеличение мощности излучения и скорости обработки приводит к линейному изменению глубины и ширины зон закалки. Применение линейных уравнений регрессии показало незначительное расхождение расчетных и экспериментальных значений не более 2,9%. Микротвердость изменяется в пределах 6870-7680 МПа. Износостойкость поверхности трения с лазерной закалкой с шагом 5 мм повышается на 130 и 40% по сравнению с исходной и объемно закаленной сталью соответственно.

Список литературы

1. Li H., Zhou H., Zhang P. et al. Influence of Laser Energy Density on Acquisition and Wear Resistance of Bionic Semisolid Unit of 40Cr Steel. [J. Materials Engineering and Performance](#). 2020. Vol.29. P. 2283–2295. [DOI:10.1007/s11665-020-04735-8](#)

2. Бирюков В.П., Фишков А.А., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В. Влияние лазерного упрочнения круглым, профилированным и колеблющимся лучом на повышение ресурса работы деталей машин //ФОТОНИКА. 2017. №3. С.28-34. DOI: [10.22184/1993-7296.2017.63.3.28.34](https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.63.3.28.34).

В.П. БИРЮКОВ

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

В работе представлены результаты металлографических и трибологических исследований многокомпонентных покрытий с добавлением в состав шихты ультрадисперсного карбида титана. С помощью полного факторного эксперимента определены геометрические параметры наплавленных покрытий в зависимости от мощности, скорости обработки и диаметра лазерного луча. Получены закономерности изменения коэффициентов трения от давления и скорости скольжения. Задиристость и износостойкость покрытий выше стальной основы.

V. P. BIRYUKOV

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

DETERMINATION OF THE GEOMETRIC PARAMETERS AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COATINGS ON STEEL BY THE LASER CLADDING

The paper presents the results of metallographic and tribological studies of multicomponent coatings with the addition of ultradiisperse titanium carbide to the composition of the charge. Using a full factorial experiment, the geometric parameters of the deposited coatings were determined depending on the power, processing speed, and diameter of the laser beam. The regularities of the change in the coefficients of friction from the pressure and the sliding speed are obtained. The corrosion resistance and wear resistance of the coatings are higher than the steel base.

Низкоуглеродистые нержавеющие стали широко используются в авиационной, химической и ядерной промышленности благодаря хорошей коррозионной стойкости. Однако они имеют низкую твердость и износостойкость. Для повышения ресурса работы на поверхности трения нержавеющих сталей наплавляют покрытия на основе никеля, кобальта [1] или высокоэнтропийные сплавы [2], которые имеют высокую стоимость из-за повышенных требований к химической чистоте 99,5-99,9% входящих элементов. Целями работы являются определение геометрических параметров зон лазерной наплавки многокомпонентных порошков от режимов обработки и влияние

введения в состав шихты ультрадисперсных частиц карбида титана (TiC) на трибологические свойства покрытий.

В экспериментальных исследованиях использовали лазерный комплекс ИМАШ РАН. Образцы изготавливали из стали 12X13 размерами 15×20×70 мм. Для изготовления шихты выбраны порошки на основе никеля (Ni-Cr-B-Si) и кобальта (Co-Cr-W-Ni-Si-B) в соотношении 3:1 соответственно с размером частиц 40-150 мкм. Порошок ультрадисперсного TiC с размером частиц 1-15 мкм добавляли в шихту 5 и 10 масс.%. Шликерные покрытия наносили толщиной 0,85-0,91 мм. В качестве связующего материала использовали водный раствор оксиэтилцеллюлозы. Варьируемыми параметрами были выбраны мощность излучения $P=700-1000$ Вт, скорость обработки $V=7-10$ мм/с и диаметр пучка $d=2,5-3,5$ мм. В качестве дополнительного фактора рассматривалось сканирование луча с фиксированной частотой $f=218$ Гц. Для определения трибологических характеристик проводили испытания при скорости скольжения и давлении на образец в интервале 0,25–3,5 м/с и 1–6 МПа соответственно. В качестве смазочного материала использовали масло ТП22С.

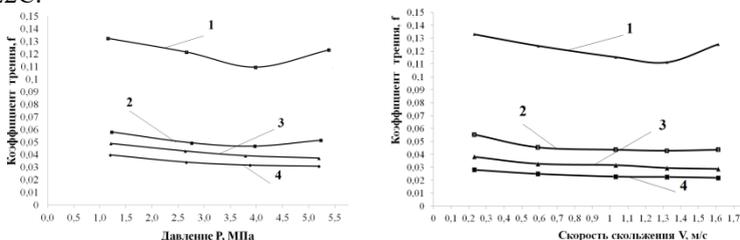


Рис. 1. Зависимость коэффициентов трения от давления (а) и скорости скольжения (б): 1 – сталь 12X13, 2 – (Ni-Cr-B-Si, Co-Cr-W-Ni-Si-B) 3- (Ni-Cr-B-Si, Co-Cr-W-Ni-Si-B) + 5 масс.% TiC, 4 - (Ni-Cr-B-Si, Co-Cr-W-Ni-Si-B) + 10 масс.% TiC

С увеличением давления с 1,2 до 4,0 МПа коэффициент трения падает в наплавленном покрытии и стали 12X13. Минимальные коэффициенты трения и интенсивности изнашивания получены при содержании в шихте 10 масс.% TiC. Значения микротвердости в покрытии с содержанием 10 масс.% TiC составили 8700-10800 МПа.

Список литературы

1. Jeyaprakash N. et al. Wear Tribo-Performances of Laser Cladding Colmonoy-6 and Stellite-6 Micron Layers on Stainless Steel 304 Using Yb:YAG Disk Laser. Metals and Materials International. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00526-6>
2. Liu H. et al. Microstructural evolution and properties of dual-layer CoCrFeMnTi0.2 high-entropy alloy coating fabricated by laser cladding //Optics and Laser Technology. 2021. 134. 106646. DOI:10.1016/j.optlastec.2020.106646

А.Д. ВОРОНЦОВА¹ А.В. ШУТОВ²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

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

ФИЛАМЕНТАЦИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИННОЙ ВОЛНЫ 248 НМ В ВОЗДУХЕ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ И ОСНОВНЫХ ВХОДЯЩИХ В ЕГО СОСТАВ ГАЗАХ

В работе экспериментально исследовалось влияние влажности воздуха на распространение высокоинтенсивного лазерного излучения с длинной волны 248 нм в режиме филаментации. Исследована филаментация в воздухе различной влажности, кислороде и азоте.

A. D. VORONTSOVA, A. D. SHUTOV

Bauman Moscow State Technical University, Russia

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

FILAMENTATION HIGH INTENSITY 248 NM ULTRAVIOLET LASER PULSE IN AIR WITH DIFFERENT HUMIDITY AND ITS CONSTITUENT GASES

In this work, we experimentally studied the influence of air humidity on high intensity ultraviolet laser pulse nonlinear propagation in filamentation mode. Filamentation was observed in air with different humidity, oxygen and nitrogen.

Филаментация высокоинтенсивного излучения это режим нелинейного распространения оптического импульса, мощность которого превышает критическую мощность самофокусировки излучения.

Образующиеся при филаментации плазменные каналы представляют интерес для удаленного мониторинга загрязнения атмосферы, направленной передачи электромагнитного излучения, коммутации высоковольтных разрядов; для создания активных систем молниезащиты [1].

Большинство исследований филаментации сделаны с использованием инфракрасного (ИК) излучения, что обусловлено, в первую очередь, широким распространением мощных Ti:сапфировых и Nd:YAG лазерных систем, работающих на длинах волн 800 и 1064 нм

соответственно. Относительно небольшое число опубликованных работ по УФ филаментации имеет ряд противоречий как по параметрам УФ филаментов, так и по механизму УФ филаментации.

Считалось, что УФ излучение главным образом ионизирует воздух за счет прямой 3-фотонной ионизации молекул кислорода. Но в недавних исследованиях было выявлено, что многофотонная ионизация атмосферного воздуха на длине волны лазерного излучения 248 нм в области интенсивности 10^8 – 10^{13} Вт/см² происходит в основном за счет ионизации молекул H₂O, естественным образом содержащихся в воздухе [2].

В эксперименте регистрировался поперечный профиль УФ филамента вдоль оси распространения в различных газах. Зная распределение интенсивности, через сечения МФИ, вычисляется концентрация электронов в плазме. Из полученных результатов (таблица 1), видно:

- Пиковая интенсивность в импульсе с увеличением концентрации молекул воды в воздухе понижается. Это объясняется потерями энергии, связанными с высокой способностью молекул воды к поглощению (и как следствие и ионизации) УФ излучения.
- Плотность электронов в фотоионизированной УФ излучением плазме существенно увеличивается (на 2 порядка) при достижении высокой относительной влажности воздуха.

<i>Влажность воздуха</i>	<i>d_f, мкм</i>	<i>I_f × 10¹², Вт/см²</i>	<i>N_e см⁻³</i>
90%	480 ± 50	2,9 ± 0,6	(2,4 ± 1,4) × 10 ¹⁴
25%	400 ± 40	3,5 ± 0,7	(1,1 ± 0,6) × 10 ¹³
0%	380 ± 40	3,8 ± 0,8	(1,3 ± 0,7) × 10 ¹²

Таблица 1 Параметры филаментов в воздухе различной влажности

Список литературы

1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащита. М.: Физматлит, 2001.

2. A. V. Shutov, N. N. Ustinovskii et. al «Major pathway for multiphoton air ionization at 248 nm laser wavelength» *Applied Physics Letters* **111**, 224104 (2017).

А.А. ГАРМАТИНА¹, М.М. НАЗАРОВ¹, Б. Г. БРАВЫЙ³,
В. М. ГОРДИЕНКО²

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

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

Институт проблем химической физики, Черноголовка, Россия.

РЕНТГЕНОВСКИЙ ОТКЛИК ПРИ КОНТРОЛИРУЕМОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА НА МИШЕНЬ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Исследована зависимость выхода рентгеновского излучения из медной мишени в воздухе от длительности фемтосекундного лазерного импульса (энергия 6мДж) и условий фокусировки. Получено, что выход оказывается максимальным при фокусировке внеосевой параболой 5 см и длительности импульса порядка 700фс. Выход рентгеновских фотонов составляет порядка $2 \cdot 10^5$ фот/импульс в 2л. Гелиевый поддув в зону взаимодействия позволяет увеличить выход РИ более чем на порядок и достигнуть выхода РИ порядка 10^7 фот/импульс в 2л.

A.A.GARMATINA¹, M.M.NAZAROV¹, B.G.BRAVY³,
V.M.GORDIENKO²

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

²Faculty of Physics M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Institute of Problems of Chemical Physics, Chernogolovka, Russia

X-RAY RESPONSE UNDER CONTROLLED INTERACTION OF A FEMTOSECOND LASER BEAM TO A TARGET IN A GAS MEDIA

The dependence of the X-ray output from a copper target placed in air on the duration of a femtosecond laser pulse (energy 6mJ) and the focusing conditions is studied. It is found that the output is maximal when focusing with an off-axis parabola of 5 cm and a pulse duration of about 700 fs. The output of X-ray photons is about $2 \cdot 10^5$ phot/pulse in 2л. Helium blowing into the interaction zone makes it possible to increase the output of X-ray by more than an order of magnitude and achieve the value about 10^7 phot/ pulse in 2л.

Фемтосекундная лазерно-индуцированная генерация рентгеновского излучения, вызывает интерес в связи с задачами время разрешенной рентгеновской дифракции. Так как не всегда комфортно работать в вакуумных условиях, востребован компактный лазерно-плазменный источник рентгеновского излучения, который функционирует в нормальных условиях. В этом случае ионизация

молекул воздуха в приповерхностной области мишени сопровождается истощением лазерной энергии, а также самоиндуцированной дефокусировкой лазерного пучка. Эти процессы приводят к ограничению уровня интенсивности и следовательно уменьшают эффективность конверсии в рентгеновское излучение. Известно, что увеличение остроты фокусировки может приводить к росту максимально достижимой интенсивности, а увеличение длительности (за счет chirpирования) импульса совместно с подъемом лазерной энергии позволяет увеличить выход рентгеновского излучения при в режиме взаимодействия с мишенью в воздухе. Еще одна возможность повышения интенсивности возникает при использовании локального поддува газа с большим потенциалом ионизации (гелия) в область взаимодействия.

Целью данной работы является определение условий, при которых достигается максимальный выход К-характеристического излучения при воздействии на мишень, расположенную в воздухе, фемтосекундных лазерных импульсов.

Проведенное нами численное моделирование распространения фемтосекундного сфокусированного лазерного пучка показало возможность увеличения интенсивности излучения и плотности лазерной энергии в условиях ограничения уровня интенсивности (как результат лазерно-иницированной локальной ионизации) с увеличением длительности импульса и остроты фокусировки. Это должно приводить к увеличению выхода рентгеновских фотонов.

В результате выполненных нами экспериментов получено, что при фокусировке в воздухе Ti;Sa лазерных импульсов с энергией 6 мДж, увеличение остроты фокусировки в три раза (использованы внеосевые параболы фокусами 15 см до 5 см) приводит к увеличению потерь на ионизацию в воздухе при спектрально-ограниченном импульсе (30 фс) с 46% до 73% , а увеличение длительности импульса до 700 фс за счет chirpирования приводит к уменьшению потерь до 37% (в случае фокусировки 5 см внеосевой параболой).

Исследована зависимость выхода рентгеновского излучения из медной мишени в воздухе от длительности фемтосекундного лазерного импульса (энергия 6 мДж) и условий фокусировки. Получено, что выход оказывается максимальным при фокусировке внеосевой параболой 5 см и длительности импульса порядка 700 фс.. Выход рентгеновских фотонов составляет порядка $2 \cdot 10^5$ фот/импульс в 2л. Гелиевый поддув в зону взаимодействия позволяет увеличить выход РИ более чем на порядок и достигнуть выхода РИ порядка 10^7

фот/импульс в 2л необходимого для проведения в дальнейшем время-разрешенных дифракционных экспериментов.

Работа поддержана проектами РФФИ N18-29-20074, N[18-02-40032](#).

К.А. ГЛУШКОВ, И.Б. МУХИН
ИИФ РАН, Нижний Новгород

ГЕНЕРАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ ИЗ СУБ-ПС ЛАЗЕРА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ

Фемтосекундные импульсы с несколькими периодами осцилляций поля являются незаменимыми инструментами для исследований как в нелинейной оптике, так и в физике сильного поля. С помощью нового подхода генерации фемтосекундных импульсов напрямую из излучения лазера накачки разработана и изготовлена параметрическая система, генерирующая фемтосекундные импульсы с уровнем энергии в десятки мкДж и длительностью импульсов в несколько осцилляций поля в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах.

K.A. GLUSHKOV, I.B. MUKHIN
IAP RAS, Nizhny Novgorod

GENERATION OF FEMTOSECOND PULSES IN THE NEAR AND MID-IR RANGES FROM A SUB-PS LASER WITH PARAMETRIC PUMPING

Femtosecond pulses with several periods of field oscillations are indispensable tools for research both in nonlinear optics and in high-field physics. Using a new approach to generating femtosecond pulses directly from the radiation of a pump laser, a parametric system was developed and manufactured that generates femtosecond pulses with an energy level of tens of μJ and a pulse duration of several field oscillations in the near and mid infrared ranges.

Сочетание новых подходов широкополосного ОРСРА усиления, современных источников накачки с высокой средней мощностью (в том числе мощных пикосекундных лазеров), использование чирпированных зеркал и новых типов нелинейных кристаллов значительно улучшает выходные параметры современных высокоинтенсивных лазеров [1]. В данной работе представлена разработка нового дизайна фемтосекундного лазера основанного на генерации белого света и параметрическом преобразовании суб-пс импульсов лазера, легированного иттербием.

Суб-пс импульсы суб-мДж энергии иттербиевого лазера частично преобразуются во 2-ю гармонику и используются для генерации излучения суперконтинуума. Далее, это широкополосное излучение

параметрически усиливается, и для усиления используется излучение 2-й гармоники. В результате, генерируется «холостое» излучение на разностной длине волны (~ 2 мкм), обладающее свойством стабилизации фазы э/м поля относительно огибающей (СЕР) [2]. Это излучение может быть дополнительно параметрически усилено с использованием исходного излучения в качестве накачки. В качестве альтернативы излучение разностной частоты может быть преобразовано во 2-ю гармонику и усилено также 2-й гармоникой исходного излучения. Это сгенерированное широкополосное излучение может быть компрессировано до спектрально ограниченной длительности. Для исследования спектральных и временных характеристик выполнены исследования лазерных импульсов с помощью прибора, работающего на методе FROG-SH. [3].

Важным преимуществом разработанного дизайна генерации фс лазерных импульсов является их оптическая синхронизация с импульсами лазера накачки высокомоощных параметрических систем. На основе полученных результатов были изготовлены 2 задающих фемтосекундных системы с центральной длиной волны 910 нм и 2100 нм с килгерцовой частотой повторения импульсов. В лазерной системе среднего ИК диапазона достигнуто более 20 мкДж энергии в импульсе при длительности 35 фс. Далее, этот сигнал будет дополнительно параметрически усилен до мульти-ТВт уровня пиковой мощности. В установке с излучением в ближнем инфракрасном диапазоне достигнуто 15 мкДж с длительностью 27 фс, она будет использоваться в качестве стартовой для ПВт лазерного комплекса PEARL.

Список литературы

1. Front-end system for few circle OPCPA amplification; I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, E. A. Perevezentsev, O. V. Palashov; Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia
2. Baltuška A., Fuji T. and Kobayashi T., in Physical Review Letters vol. 88: American Physical Society, 2002, p. 133901
3. <https://www.femtoeasy.eu/products/frog.php>

А.И. ГОРОХОВ, И.Б. МУХИН

Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород

СИСТЕМА СТРЕТЧЕР-КОМПРЕССОР НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ЧИРПИРУЮЩИХ БРЕГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ВЫСОКОМОЩНОГО ДИСКОВОГО ЛАЗЕРА

Данная научно-исследовательская работа посвящена исследованиям временных характеристик лазерного излучения разрабатываемой в ИПФ РАН фемтосекундной лазерной установки среднего инфракрасного диапазона. В частности, была разработана система стретчер-компрессор для усиления пс импульсов в дисковом регенеративном усилителе, которые в дальнейшем будут использоваться в качестве накачки следующего параметрического каскада усиления. В том числе, были произведены исследования, направленные на поиск оптимального решения, позволяющего уменьшить длительность пс импульсов до требуемых значений.

A.I. GOROKHOV, I.B. MUKHIN

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

STRETCHER-COMPRESSOR SYSTEM BASED ON VOLUMETRIC CHIRPED BRAGG GRATINGS FOR A HIGH-POWER DISK LASER

This research work is devoted to the study of the temporal characteristics of laser radiation of a femtosecond laser device in the mid-infrared range being developed at IAP RAS. In particular, a stretcher-compressor system has developed for amplifying ps pulses in a disk regenerative amplifier, which will later be used as a pump for the next parametric gain stage. Including, studies have conducted, aimed at finding the optimal solution that allows reducing the duration of the ps pulses to the required values.

Одним из основных ограничений при усилении высокоэнергетических пс и фс импульсов является оптический пробой активных элементов лазера из-за ультра-высокой пиковой мощности излучения. Для преодоления этого ограничения применяется подход усиления чирпированных импульсов (CPA). В данной работе исследована возможность применения чирпирующих объемных брегговских решеток[1] для стретчирования и компрессии лазерных импульсов с одновременно высокой средней и пиковой мощностью. Данная схема включает в себя иттербиевый источник излучения, две брегговские решетки и дисковый регенеративный усилитель.

Первым этапом работы было исследование спектральных и временных характеристик высокоомощного лазерного импульса, усиленного с применением СРА подхода. С помощью автокорреляционного подхода измерения длительностей была получена длительность импульса источника излучения на входе равная 154 пс. Ширина спектра излучения составляет при этом 8 нм. Далее этот сигнал был направлен в чирпирующую объемную брэгговскую решетку, функция пропускания которой ограничивает выходной спектр до 2.82 нм. Важно, что главной особенностью чирпирующей объемной брэгговской решетки заключается в том, что для разных длин волн условие Брегга выполняется на разной глубине внутри решетки. Таким образом, длинноволновая часть излучения отражается от передней части решетки, а коротковолновая – от задней. Это обеспечивает формирование временной задержки между различными спектральными компонентами излучения – то есть, к формированию чирпированного импульса. Вследствие этого были произведены расчеты, по результатам которых длительность импульса после первой решетки равна 481 пс, что близко к значениям полученным с помощью быстрого фотодиодного осциллографа (~550 пс). Далее, этот сигнал был усилен в регенеративном дисковом усилителе до энергии в 10 мДж с частотой повторения до 10 кГц. После компрессии данного сигнала аналогичной брэгговской решеткой, установленной обратной стороной, сигнал был снова направлен в автокоррелятор для измерения длительности, значение которой получилось равным 64 пс при ширине полосы излучения 2.8 нм. Поскольку для параметрического усиления длительность импульса после регенеративного усилителя должна составлять менее 30 пс, в систему стретчер-компрессор добавлено еще одно спектральное устройство – фильтр Вуда, который был установлен перед первой брэгговской решеткой и ширина спектра излучения была уменьшена с 2.8 до 1.88 нм. В результате, после компрессора измеренная длительность импульса действительно уменьшилась и составила 34 пс. Именно такая длительность лазерных импульсов требуется для использования в качестве пикосекундной параметрической накачки при усилении фемтосекундных импульсов в разрабатываемой мульти-ТВт лазерной системе среднего инфракрасного диапазона [2].

Список литературы

1. Л. Глебов, В. Смирнов, Э. Ротари, И. Коханоски, Л. Глебова, О. Смольски, Ж. Люмо, К. Лантигуа, А. Глебов, *Оптическая инженерия* 53 (5), 051514 (май 2014 г.)
2. И. Б. Мухин, М. Р. Волков, И. А. Викулов, Е. А. Перевезенцев, О. В. Палашов, *Квантовая электроника*, 50:4 (2020), 321–326 [*QuantumElectron.*, 50:4 (2020), 321–326]

Е.А. ДАНИЛОВ, С. А. УРЮПИН

Москва, Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук

ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ТОНКУЮ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПЛЕНКУ

Изучена генерация терагерцового излучения, возникающего при воздействии фемтосекундного импульса s-поляризованного лазерного излучения на пленку металла. Получено выражения для низкочастотных токов, возникающих за счет силы увлечения, а также ввиду неоднородного нагрева образца. Вычислены фурье-образы низкочастотного магнитного поля, генерируемого нелинейными токами. Показано, что когда толщина пленки меньше масштаба неоднородности низкочастотного поля амплитуда терагерцового сигнала возрастает обратно пропорционально толщине пленки. Если же толщина пленки меньше и глубины скин-слоя на частоте лазерного излучения, то низкочастотный сигнал усиливается обратно пропорционально квадрату толщины пленки.

E.A. DANILOV, S.A. URYUPIN

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

GENERATION OF LOW-FREQUENCY RADIATION UNDER THE EFFECT OF A LASER PULSE ON A THIN METAL FILM

The generation of terahertz radiation generated at the effect of a femtosecond pulse of s-polarized laser radiation on a metal film has been studied. Expressions are obtained for low-frequency currents arising due to the drag force, as well as due to inhomogeneous heating of the sample. The Fourier transforms of a low-frequency magnetic field generated by nonlinear currents are calculated. It is shown that when the film thickness is less than the scale of the inhomogeneity of the low-frequency field, the amplitude of the terahertz signal increases inversely with the film thickness. If the film thickness is less than the skin-layer depth at the laser frequency, then the low-frequency signal is amplified in inverse proportion to the square of the film thickness.

Работа [1] посвящена исследованию генерации низкочастотного излучения при воздействии фемтосекундного s-поляризованного лазерного импульса на металлическую пленку. Рассмотрены два механизма генерации. Первый из них связан с эффективным нагревом электронов [2], приводящим к возникновению градиента электронного

давления, а второй - с действием силы увлечения, порождающей направленное движение электронов вдоль поверхности металла [3].

Приведены выражения для высокочастотного поля в пленке, создаваемого s-поляризованным фемтосекундным лазерным импульсом. В условиях слабого неоднородного нагрева электронов записано уравнение для малого возмущения давления и найден источник тока увлечения. Также были сформулированы уравнения для фурье-образов низкочастотных электрических и магнитных полей. Используя общее решение этих уравнений и условия неразрывности тангенциальных компонент поля на границах пленки, были найдены фурье-образы низкочастотного магнитного поля, создаваемого градиентом давления электронов и силой увлечения.

Проанализированы выражения для фурье-образов низкочастотного магнитного поля на поверхности пленки. Показано, что в случае, когда высокочастотное поле локализовано у поверхности пленки, а низкочастотное поле слабо неоднородно по толщине пленки, амплитуда низкочастотного сигнала растет обратно пропорционально толщине пленки с ее уменьшением. В случае, когда толщина пленки меньше глубины скин-слоя на частоте лазерного излучения, реализуется еще большее увеличение эффективности генерации, и при этом амплитуда низкочастотного сигнала растет обратно пропорционально квадрату толщины пленки.

Список литературы

1. Danilov E.A., Uryupin S.A. Quantum Electron. (49), 241 (2019).
2. Oladyshkin I.V., Fadeev D.A., Mironov V.A., J. Opt. (17), 075502 (2015).
3. Bezhanov S.G., Uryupin S.A. Quantum Electron. (43), 1048 (2013).

О.В. ДЕВИЦКИЙ

*Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Россия
Северо-кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия*

**ФЛУКТУАЦИИ СОСТАВА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ
 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Py}$, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ НА
ПОДЛОЖКАХ Si**

Исследовано влияние дисперсности для шихты мишени на состав пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Py}$ на Si, полученных методом импульсного лазерного напыления. Показано, что при дисперсности шихты для мишени 20 мкм отсутствует флуктуация состава в тонких пленках $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Py}$.

O.V. DEVITSKY

*Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow. Rostov-on-Don, Russia
North Caucasus Federal University, Moscow. Stavropol, Russia*

**COMPOSITION FLUCTUATIONS IN THIN FILMS
 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Py}$ OBTAINED BY PULSED LASER DEPOSITION
ON Si SUBSTRATES**

The effect of dispersion for a target charge on the composition of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Py}$ films on Si obtained by pulsed laser deposition is studied. It is shown that when the dispersion of the charge for the target is less than 20 μm , there is no fluctuation of the composition in thin $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Py}$ films.

Импульсное лазерное напыление (ИЛН) достаточно перспективный и быстроразвивающийся метод получения тонких пленок и гетероструктур [1]. Отличительной особенностью этого метода является дискретный перенос материала мишени на поверхность подложки.

Импульсное лазерное напыление тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Py}$ на Si(100) происходило в атмосфере аргона чистотой 99.999% при давлении 2 Па. Использовалось лазерное излучение второй гармоники АYG:Nd³⁺-лазера (532 нм). Расстоянии между мишенью и подложкой составляло 50 мм, температура подложки 350 °С. Плотность энергии лазерного импульса равнялась 3,2 Дж/см².

Определение элементного состава осуществлялось методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA 3 LMH с системой определения элементного состава AZtecEnergy Standard/Xmax 20. Формирование мишени осуществлялось методом

холодного прессования. Для получения шихты мишени рассчитывалась масса порошков GaP, GaAs и InAs. Сформированная шихта перетиралась, а затем просеивалась на ситах размером ячейки от 20; 56; 78; 100 мкм. Затем при помощи изостатического пресса под давлением 207 МПа были сформированы мишени $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}_{0.66}\text{P}_{0.34}$ с соответствующей дисперсностью шихты для мишени. Измерение состава на поверхности пленки производилось в пяти точках - по углам и в центре пленки.

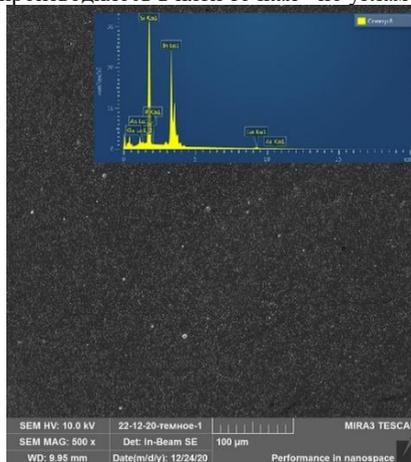


Рис. 1. СЭМ-изображение и EDS спектр поверхности пленки $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}_{0.66}\text{P}_{0.34}$ на Si

Отмечено, что при дисперсности шихты для мишени: 56, 78 и 100 мкм наблюдались флуктуации состава пленки около 1 - 1,5%. При дисперсности шихты для мишени 20 мкм отсутствует флуктуация состава в тонких пленках $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}_{0.66}\text{P}_{0.34}$ на кремниевой подложке.

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания «Разработка и создание полупроводниковых гетероинтерфейсов на основе многокомпонентных материалов для устройств СВЧ-электроники и фотоники» на 2021 г. (номер государственной регистрации АААА-А19-119040390081-2).

Список литературы

1. L.S. Lunin, M.L. Lunina, O.V. Devitsky and others // Semiconductors. 2017. Vol. 55, № 3, P. 387–391.

Е.О. ЕПИФАНОВ¹, А.Г. ШУБНЫЙ¹, Н.В. МИНАЕВ¹,
А.О. РЫБАЛТОВСКИЙ¹, О.П. ПАРЕНАГО²

¹*Институт Фотонных Технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»
РАН, Москва, Россия*

²*Институт нефтехимического синтеза РАН, Москва, Россия*

ФОРМИРОВАНИЕ НАНЕСЕННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО CO₂

Продемонстрирован метод по получению химически чистого гетерогенного катализатора на основе НЧ палладия и пористых неорганических носителей, таких как оксид алюминия и сибунит. Проведено исследование зависимости насыщения носителей наночастицами палладия в сверхкритическом диоксиде углерода от времени абляции металлической мишени палладия.

Е.О. EPIFANOV¹, A.G. SHYBNI¹, N.V. MINAEV¹,
A.O. RYBALTOVSKII¹, O.P. PARENAGO²

¹*Institute Photon Technologies, FSRC «Crystallography and photonics» RAS, RF*
²*A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis RAS, RF*

FORMATION OF SUPPLIED HETEROGENEOUS CATALYSTS USING THE METHOD OF LASER ABLATION IN A SUPERCRITICAL CO₂ MEDIUM

A method for obtaining a chemically pure heterogeneous catalyst based on palladium NP and porous inorganic carriers such as alumina and sibunit is demonstrated. The study of the dependence of the saturation of carriers with palladium nanoparticles in supercritical carbon dioxide on the time of ablation of a palladium metal target has been carried out.

В докладе представлено дальнейшее развитие подхода [1] к получению нанесенных гетерогенных катализаторов при лазерной абляции металлического палладия с осаждением на Al₂O₃ в среде сверхкритического диоксида углерода. Носителем металлических наночастиц являлся порошок Al₂O₃ с размером частиц от 160 до 250 и от 250 до 500 мкм [2]. Также были использованы гранулы сибунита размером 1 – 1,5 мм. В качестве излучателя был использован высокочастотный импульсный волоконный лазер (λ – 1064 нм, τ – 2 нс, $E_{\text{л}}$ – 0,5 мДж, ν – 60 кГц). Схема установки и ее общий вид представлены на рисунке 1. Система позволяет осуществлять одностадийный процесс создания катализаторов. Методом абляции твердых металлических мишеней благородных металлов нарабатываются наночастицы, затем они осаждаются и внедряются на поверхность и в свободный объем неорганических носителей.

Излучение волоконного лазера (1) заводится в реактор высокого давления (3) через сканирующую систему (2). Высокая концентрация наночастиц формируется методом лазерной абляции металлической мишени (5). Трек лазерного луча (4) демонстрирует процесс образования наночастиц. Неорганический носитель находится на дне реактора высокого давления. В процессе абляции магнитная мешалка (6) включается, и магнитный якорь внутри реактора перемешивает носитель для равномерного осаждения на нем полученных наночастиц. Среда $scCO_2$ способствует более эффективному процессу нанесения наночастиц на носители благодаря своим транспортным свойствам.

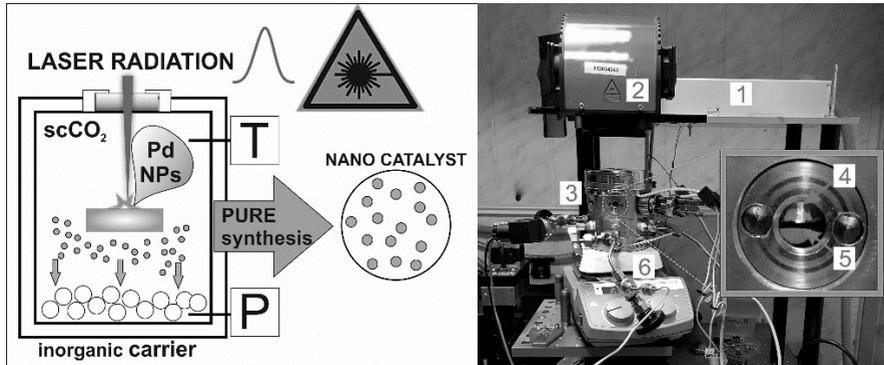


Рис. 1. Слева – принцип и схема метода, справа – общий вид установки с врезкой мишени палладия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-06032) и Министерства науки высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных и сверхкритических технологий.

Список литературы

1. Parenago O.P. et al. // Synthesis of Supported Heterogeneous Catalysts by Laser Ablation of Metallic Palladium in Supercritical Carbon Dioxide Medium // *Molecules*. 2020. Vol. 25, № 24. P. 5807.
2. Епифанов Е.О. и др. // Синтез нанесенных гетерогенных катализаторов при лазерной абляции металлического палладия с осаждением на оксид алюминия в среде сверхкритического диоксида углерода // *Сверхкритические флюиды: теория и практика*. 2019. Vol. 14, № 3. P. 64–70.

В.С. ЖИГАРЬКОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ
*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»
РАН 108840, Москва, Троицк, Пионерская, 2*

ЛАЗЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ МИКРОБНЫХ СИСТЕМ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Лазерная печать гелевыми микрокаплями (лазерная инженерия микробных систем, ЛИМС), содержащими живые организмы, является перспективной технологией, применимой в микробиологии, биотехнологии и медицине. Продемонстрированы практические возможности применения данной технологии. Представлены возможные ограничения технологии при работе с живыми культурами микроорганизмов.

V.S. ZHIGARKOV, N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV
*IPT RAS, FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, 108840, Moscow,
Troitsk, Pionerskaya 2*

LASER ENGINEERING OF MICROBIAL SYSTEMS: SCOPE AND PROSPECTS

Laser printing with gel microdroplets (laser engineering of microbial systems, LEMS) containing living organisms is a promising method for microbiology, biotechnology, and medicine. The practical capabilities of this technology are demonstrated. Possible limitations of the technology when working with live microorganisms cultures are presented.

Технология лазерной биопечати гелевыми микрокаплями крайне актуальна для биомедицинского и биотехнологического применения [1]. В частности, с её помощью возможно быстро и эффективно выделять чистые культуры ранее некультивированных микроорганизмов из природных сообществ с целью получения продуцентов биологически активных веществ (антибиотики, ферменты), создания микробных топливных элементов (быстрый скрининг микробных культур на способность к электрогенезу). Одним из успешных направлений лазерной биопечати является лазерная инженерия микробных систем [2].

При осуществлении лазерной печати (рис. 1) на донорную пластину (стеклянная пластина с тонким поглощающим металлическим слоем золота, титана, хрома и т.п.) наносится слой гелевого субстрата, содержащий живые клетки и/или микроорганизмы. Воздействие сфокусированным импульсным лазерным излучением приводит к

локальному нагреву металлического слоя и возникновению, быстро расширяющегося кавитационного пузыря и формированию струи [2]. В результате, на приёмные среды переносится малый объем геля, содержащий в себе малое число живых клеток или микроорганизмов.

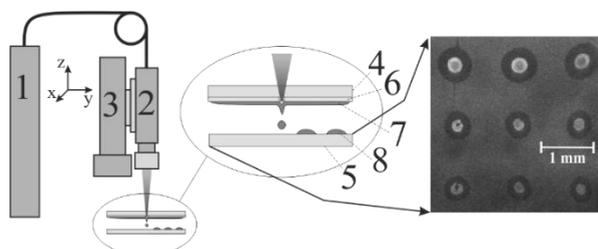


Рис. 1. Схема установки. 1 – иттербиевый волоконный лазер, 2 – формирователь оптического луча, 3 – система позиционирования лазера, 4 – донорная пластинка, 5 – акцепторная пластинка, 6 – металлическое покрытие, 7 – слой геля с микроорганизмами, 8 – образованные при переносе микрокапли. Справа – изображения матрицы кристаллизованного вещества микрокапель на акцепторной пластинке, полученного при помощи сканирующей электронной микроскопии.

Использование возможностей лазерной микровыборки позволяет с высокой эффективностью выделять чистые культуры, разделять синтрофные микробные сообщества [3], а также позволяет разделять микроорганизмы со значительно отличающимися темпами роста.

Тем не менее, существует целый ряд факторов, возникающих в процессе лазерной биопечати, которые необходимо учитывать. Оценка возможных негативных воздействий позволит улучшить существующую технологию.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части лазерных воздействий, гранта РФФИ 20-14-00286 в части развития технологии лазерной инженерии микробных систем.

Список литературы

1. Arnold C. B., Serra P., Piqué A.// *Mrs Bull.* 2007. Vol. 32, №. 1, P. 23-31.
2. Yusupov, V. I., Zhigar'kov, V. S., Churbanova and others// *Quantum Electronics.* 2017. Vol. 47, № 12, P. 1158.
3. Kochetkova T. V. and others// *IJSEM.* 2020. Vol. 70, №. 2, P. 1192-1202.

А.В.ИВАЩЕНКО, Д.А. КОЧУЕВ, Н.Н. ДАВЫДОВ

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

ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

В работе приведены результаты эксперимента по лазерной обработке мишени из оксида алюминия, легированной тербием и иттербием. Анализ полученного порошкового материала проводился на растровом электронном микроскопе. В ходе исследования был синтезирован порошковый материал из оксида алюминия с примесями тербия и иттербия, имеющий наноразмеры, сферичную форму и узкий гранулометрический состав. Данные результаты могут быть использованы в области синтеза высокочистой лазерной керамики.

A.V. IVASHCHENKO, D.A. KOCHUEV, N.N. DAVIDOV

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

FEMTOSECOND LASER SYNTHESIS OF NANOPARTICLES FROM ALUMINUM OXIDE

This paper presents the results of an experiment on laser processing of an aluminum oxide target doped with terbium and ytterbium. The analysis of the obtained powder material was carried out using a scanning electron microscope. In the course of the study, a powder material was synthesized from aluminum oxide with impurities of terbium and ytterbium, which has nanosize, spherical shape and narrow particle size distribution. These results can be used in the synthesis of high-purity laser ceramics.

В настоящее время большой практический и научный интерес представляет собой лазерная керамика [1,2], в основе которой могут лежать такие материалы, как оксид алюминия, диоксид циркония (ZrO_2), карбид кремния (SiC) и другие. На сегодняшний день существует большое количество методов для синтеза высокопрозрачной лазерной керамики. Однако стоит необходимость в разработке более универсальной методики, которая позволила бы при низкой стадийности и стоимости метода, синтезировать керамический порошковый материал высокого качества.

В данной работе был проведен эксперимент с использованием лазерной установки со следующими параметрами: длительность импульса 280 фс, энергия импульса 100-150 мкДж, длина волны 1029 нм, частота следования импульсов 10 кГц, фокусное расстояние объектива – 200 мм. В качестве образца был использован материал из

оксида алюминия Al_2O_3 , легированный тербием и иттербием. В качестве электрода для осаждения частиц была использована медная пластина. Напряжённость электростатического поля 15-25 кВ. Обработка происходила при нормальных условиях в среде атмосферного воздуха.

После проведения эксперимента по синтезу порошкового материала из оксида алюминия, легированный тербием и иттербием, полученные частицы были исследованы при помощи растрового электронного микроскопа (рисунок 1).

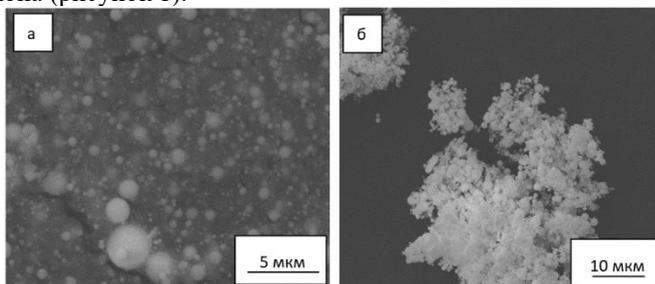


Рис. 1. РЭМ изображения порошкового материала из оксида алюминия, легированного тербием и иттербием

На рисунке 1 можно наблюдать синтезированные наночастицы оксида алюминия, легированные тербием и иттербием, которые находятся в узком размерном диапазоне и имеют форму сфер. Средний размер частиц составлял единицы нанометров. Узкий гранулометрический состав порошкового материала связан также с тем, что обработка образца происходила при режиме сканирования лазерным лучом, что позволяло полностью избегать попадания энергии в одну и ту же область. Воздействуя на образец фемтосекундным лазерным излучением с применением электрофильтра, возможно не только обеспечить эффективное удаление материала за счет увеличения вклада энергии в зону обработки, но и обеспечить осаждение частиц и их последующий сбор.

Список литературы

1. Федоров П.П., Маслов В.А., Усачев В.А., Кононенко Н.Э. Синтез лазерной керамики на основе нанодисперсных порошков алюмоиттриевого граната $Y_3Al_5O_{12}$ //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», 2012, №8. с.28-44.
2. Осипов В.В., Лисенков В.В., Платонов В.В. Лазерный синтез нанопорошков в стехиометрии иттрий-алюминиевого граната//Письма в ЖТФ, 2011, том 37, № 1. с. 103-110.

Е.В. ИОНУШАЙТЕ¹, А.В. ШУТОВ²

¹*МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

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

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАВИНЫ В ФОТОИОНИЗАЦИОННОЙ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЕ 25- НАНОСЕКУНДНОГО 248-НМ ИМПУЛЬСА KRF ЛАЗЕРА

В работе исследуются механизмы временной эволюции заряженных компонентов фотоионизационной воздушной плазмы, образующейся под действием лазерных импульсов длительностью 25 нс на длине волны 248 нм.

E. V. IONUSHYTE¹, A. V. SHUTOV²

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

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

TEMPORAL DYNAMICS OF AN ELECTRON AVALANCHE IN THE PHOTOIONIZATION PLASMA OF A 25- NANOSECOND 248 NM KRF LASER PULSE IN AIR

In this work we investigate the mechanism of the time evolution of charged components of the photoionization air plasma formed under the action of laser pulses with a duration of 25 ns at a wavelength of 248 nm.

Возможность создания в воздухе плазменных каналов с помощью лазерного излучения представляет большой интерес для исследования, так как содержащиеся в фотоионизационной плазме свободные электроны и ионы влияют на оптические и электропроводящие свойства воздуха, что открывает большие перспективы для использования плазменных каналов и волноводов для направленной передачи энергии.

В эксперименте эксимерный KrF лазер EMG 150 MSC (Lambda Physik GmbH) генерировал импульсы, длительностью 25 нс с длиной волны 248 нм с энергией 130 мДж. Излучение фокусировалось с помощью линзы с фокусным расстоянием 1 м в датчик фототока, представлявшего из себя два трубчатых электрода, таким образом, чтобы фокус линзы находился посередине между электродами. К одному из электродов был подключен блок питания, с помощью которого в межэлектродном промежутке создавалось электрическое поле напряженностью от 0.5 до 10 кВ/см. При прохождении лазерного

импульса в воздухе между электродами возникал плазменный канал, по которому протекал ток, который регистрировался с помощью осциллографа.

В результате работы было обнаружено, что при величине внешнего поля более 3,6 кВ/см во время действия лазерного импульса развивается самостоятельная электронная лавина, которая заканчивалась с падением интенсивности лазерного импульса. Ток этой лавины рос с ростом напряженности поля, однако даже при самых больших полях ~ 10 кВ/см эта лавина не приводила к оптическому пробое воздуха. При этом при увеличении поля до значений больших 8,4 кВ/см с большой задержкой после окончания лазерного импульса ~ 1 мкс, наблюдался лазерно-управляемый пробой воздуха, при этом имел место большой джиттер пробоя. К примеру, при значении поля 9,3 кВ/см, задержка между проходом лазерного импульса и последующим электрическим пробоем составляла от 0,2 до 2 мкс (рис. 1).

Столь большие задержки лазерно-управляемого пробоя могут объясняться тем, что он либо развивается за счет долгоживущих легкоионизируемых ионов, например ионов O_2^- , либо за счет эффекта снижения плотности газа [1], приводящего к росту напряженности приведенного поля E/N .

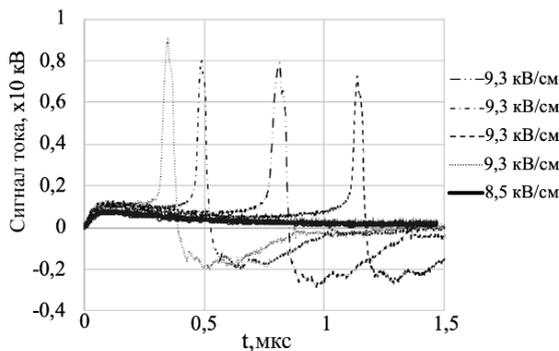


Рис. 1. Осциллограммы тока при развитии лазерно-управляемого пробоя воздуха.

Список литературы

1. Y.-H. Cheng, J. K. Wahlstrand, N. Jhajj, H. M. Milchberg The effect of long timescale gas dynamics on femtosecond filamentation 25 February 2013 / Vol. 21, No. 4 / OPTICS EXPRESS 4749

А.В. КОЛЧИН¹, С.В. ЗАБОТНОВ¹, Д.В. ОРЛОВ¹, Д.В.
ШУЛЕЙКО¹,
Л.А. ГОЛОВАНЬ¹, Д.Е. ПРЕСНОВ¹, Т.П. КАМИНСКАЯ¹,
П.И. ЛАЗАРЕНКО², С.А. КОЗЮХИН³, Т.С. КУНКЕЛЬ⁴,
П.К. КАШКАРОВ¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

²Московский институт электронной техники, Зеленоград, Россия

³Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова, Москва,
Россия

⁴Московский физико-технический институт

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК Ge₂Sb₂Te₅ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование фемтосекундного лазерного облучения аморфных тонких пленок Ge₂Sb₂Te₅ на диэлектрических подложках при различных временах экспозиции. Обнаружено, что с ее увеличением происходят как обратимые фазовые переходы, так и формирование поверхностных решеток с периодом близким к длине волны (1.25 мкм) воздействующего излучения. Данная тенденция согласуется с результатами моделирования в рамках теории Сайпа-Друде.

A.V. KOLCHIN¹, S.V. ZABOTNOV¹, D.V. ORLOV¹,
D.V. SHULEIKO¹, L.A GOLOVAN¹, D.E. PRESNOV¹,
T.P. KAMINSKAYA¹, P.I. LAZARENKO², S.A.
KOZYUKHIN³, T.S. KUNKEL⁴, P.K. KASHKAROV¹

¹Lomonosov Moscow State University

²National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Russia

³Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, Moscow, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology

FEMTOSECOND LASER MODIFICATION OF AMORPHOUS Ge₂Sb₂Te₅ THIN FILMS ON DIELECTRIC SUBSTRATES: THEORY AND EXPERIMENT

Femtosecond laser treatment of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films at the different exposure times was performed and theoretically analyzed. Exposure time growth leads to both reversible phase transitions and fabrication of surface lattices with period which is close to incident radiation wavelength (1.25 μm). This feature is confirmed with Sipe-Drude theory simulations.

Халькогенидный стеклообразный полупроводник $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225) является одним из базовых материалов для создания устройств энергонезависимой и перезаписываемой памяти вследствие значительного различия электрофизических или оптических свойств аморфной и кристаллической фазы [1]. Фемтосекундное лазерное облучение данного материала приводит не только к обратимым фазовым переходам, но и формированию поверхностного рельефа с волновым или субволновым периодом [2], которое может быть описано в рамках так называемой теории Сайпа-Друде [3]. Образование подобных одномерных решеток наблюдалось в результате облучения сверхкороткими лазерными импульсами аморфных тонких пленок GST225 на проводящих подложках [2], что стимулирует проведение дальнейших экспериментов с образцами на диэлектрических подложках.

Аморфные тонкие пленки GST225 толщиной 130 нм были осаждены методом магнетронного распыления кристаллической мишени на окисленную подложку кристаллического кремния. Обработка образцов проводилась с помощью фемтосекундной лазерной системы на основе кристалла хром-форстерита (1250 нм, 135 фс, 10 Гц, 0.1 Дж/см²) в сканирующем режиме.

Широкое крыло 110-170 см⁻¹ в спектрах КРС при длине волны возбуждения 633 нм свидетельствует об аморфной структуре исходных образцов [2]. При количестве падающих на модифицируемую область лазерных импульсов от 3 до 150 наблюдается частичная кристаллизация, что подтверждается как данными растровой электронной и атомно-силовой микроскопии, так и появлением узкого пика в диапазоне волновых чисел 110-140 см⁻¹ в спектрах КРС. В свою очередь, в режиме облучения от 150 до 750 импульсов происходит формирование поверхностного рельефа с волновым периодом, а также ориентацией, ортогональной поляризации воздействующего излучения. Данная тенденция коррелирует с результатами моделирования в рамках теории Сайпа-Друде для концентрации возбужденных носителей заряда $9.3 \cdot 10^{21}$ см⁻³. Помимо этого, при данном режиме обработки наблюдается реаморфизация ранее закристаллизованных областей, которая, наиболее вероятно, свидетельствует об обратимых фазовых переходах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-32-90111).

Список литературы

1. Guo P., et al. // Appl. Sci. 2019. V. 9(3). P. 530.
2. Kozyukhin S., et al. // Physica Status Solidi B. 2020. V. 257(11). P. 1900617.
3. J. Bonse and S Gräf // Laser Photonics Rev. 2020. V. 14(10). P. 2000215.

Д.А. ЗАЗЫМКИНА¹, А.А.ИОНИН¹, И.О.КИНЯЕВСКИЙ¹, Ю.М.
КЛИМАЧЕВ¹, А.Ю.КОЗЛОВ¹, Д.И.КОРМАШОВА¹, А.А.
КОТКОВ¹, Ж.Ф.ЛАМПИН², Ю.А.МИТЯГИН¹, С.А.
САВИНОВ¹, А.М.САГИТОВА¹, Д.В.СИНИЦЫН¹,
М.В.ИОНИН¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

²Институт электроники, микроэлектроники и нанотехнологии, Лилль,
Франция

ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО NH₃- ЛАЗЕРА С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ ИМПУЛЬСАМИ СО₂-ЛАЗЕРА ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ~ 100 МКС

Одновременно измерены с наносекундным разрешением импульсы терагерцового NH₃-лазера и электроионизационного СО₂-лазера. Определены длительности генерации и задержки начала генерации NH₃-лазера относительно начала импульса СО₂-лазера. Измерены длины волн терагерцового излучения NH₃-лазера, составившие 67.2, 83.8 и 88.9 мкм.

D.A. ZAZYMKINA¹, A.A. IONIN¹, I.O. KINYAEVSKY¹,
YU.M. KLIMACHEV¹, A.YU. KOZLOV¹, D.I. KORMASHOVA¹,
A.A. KOTKOV¹, J.F. LAMPIN², YU.A. MITYAGIN¹, S.A.
SAVINOV¹, A.M. SAGITOVA¹, D.V. SINITSYN¹, M.V. IONIN¹,

¹The P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

²Institute of Electronics, Microelectronics and Nanotechnology, Lille, France

DYNAMICS OF TERAHERTZ NH₃ LASER GENERATION AT OPTICAL PUMPING BY ~ 100 μs CO₂ LASER PULSES

Pulses of a terahertz NH₃ laser and electron-beam-sustained-discharge CO₂ laser were measured simultaneously with a nanosecond resolution. The lasing durations and the delay of the beginning of lasing of the NH₃ laser relative to the beginning of the pumping pulse of the CO₂ laser are determined. The wavelengths of terahertz NH₃ laser radiation were measured: 67.2, 83.8 and 88.9 μm.

Разработка терагерцовых (ТГц) источников лазерного излучения требуется для решения ряда задач, например, в спектроскопии, диагностике плазмы [1], для обнаружения взрывчатых и наркосодержащих веществ за препятствиями [2] и др. Перспективным источником ТГц излучения является хорошо изученный NH₃-лазер с оптической накачкой импульсным СО₂-лазером, позволяющий получить большое число линий с высокой эффективностью. Ранее длительность импульса накачки не превышала 3 мкс [3, 4].

В настоящей работе представлены результаты измерений с наносекундным разрешением импульсов излучения NH₃-лазера и электроионизационного (ЭИ) CO₂-лазера, использованного для оптической накачки. Исследовались длительности генерации и задержки начала генерации NH₃-лазера относительно начала импульса CO₂-лазера. Измерения были проведены при накачке излучением CO₂-лазера на линиях 9R(30) ($\lambda \approx 9.22$ мкм) и 9R(16) ($\lambda \approx 9.29$ мкм). Длительность импульсов накачки достигала ~ 100 мкс, а энергия импульсов – 1 Дж.

Ячейка с NH₃ имела длину 20 см с окном из NaCl для ввода излучения накачки с одной стороны и окном из лавсана для вывода ТГц излучения с другой. Внутри располагались два плоских латунных зеркала на расстоянии 12 см с отверстиями 2 мм на оси кюветы, через которые осуществлялись ввод и вывод излучения. Излучение CO₂-лазера и ИК излучение NH₃-лазера отсекались кристаллическим кварцем. Импульс NH₃-лазера измерялся болометром RS 0.4-4 Т (ЗАО “Сконтел”) с разрешением ~ 1 нс, а CO₂-лазера – фотодиодом РЕМ-L-3 с разрешением ~ 0.5 нс. Оптимальное давление в кювете с аммиаком для линий 9R(16) и 9R(30) составило 8 мбар и 2 мбар, соответственно.

Длительность генерации NH₃-лазера в зависимости от энергии импульса накачки лежала в диапазоне $10 \div 25$ мкс и $25 \div 40$ мкс для линий 9R(16) и 9R(30), соответственно. Задержка начала генерации ТГц-лазера составила $0.3 \div 2.5$ мкс для линии 9R(16) и $0.2 \div 0.6$ мкс для линии 9R(30).

Для измерения длины волны ТГц излучения была использована дифракционная решетка 6 штр./мм с углом блеска 12°. Для измерений использовался высокочувствительный пироэлектрический приемник с временным разрешением ~ 1 мс. В качестве накачки была выбрана линия 9R(30) CO₂-лазера. Были зафиксированы три линии ТГц излучения NH₃ с длиной волны 67.2 ± 1.7 , 83.8 ± 1.7 и 88.9 ± 1.7 мкм, наиболее сильной из которых оказалась линия на 83.8 мкм. Соответствующие полученным длинам волн переходы были определены по результатам работы [5]: $v_2:a(6,0)-s(5,0)$; $G:a(6,0)-s(5,0)$; $v_2:a(4,0)-s(3,0)$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-52-16019).

Список литературы

1. Верещински З.и. др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. No. 2. С. 198.
2. Federici J.F. et al. // Elsevier Science B.V. 2007. P. 323–366.
3. Woskoboinikow P., Machuzak J., Mulligan W. // IEEE J. of Quant. Electr. 21, 14. 1985.
4. T.E. Wilson // International J. of Infrared and Millimeter waves 14, 303. 1993.
5. Gullberg K., Hartmann B., Kleman B. // Phys. Scr. 1973. V. 8. P. 177.

И. В. КРЫЛАЧ¹, М. И. ФОКИНА¹, С. И. КУДРЯШОВ^{1,2},
В. Е. СИТНИКОВА¹, М. К. МОСКВИН¹, Е. О. САМУЙЛОВА¹,
Р. О. ОЛЕХНОВИЧ¹, А. В. ВЕНИАМИНОВ¹, М. В.
УСПЕНСКАЯ¹

¹*Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург,
Россия*

²*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва,
Россия*

ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ КАК СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА УГЛОВ СМАЧИВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ ПРИ ОДНОЭТАПНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

В работе исследуется лазерное структурирование систем типа «сталь-полимер». Проанализирована зависимость углов смачивания стальной подложки и систем «сталь - полиметилметакрилат» и «сталь - MicroCoat® покрытие» от плотности энергии лазерного излучения. Показано, что при одинаковых параметрах лазерной обработки, покрытие стальной подложки пленкой полимеров позволяет увеличить диапазон углов смачивания. Реализован процесс автономного градиентного течения капель воды и плазмы крови на простейших микрофлюидных модулях.

I.V. KRYLACH¹, M.I. FOKINA¹, S.I. KUDRYASHOV^{1,2},
V. E. SITNIKOVA¹, M. K. MOSKVIN¹, E. O. SAMUILOVA¹,
R. O. OLEKHNOVICH¹, A. V. VENIAMINOV¹, M. V. USPENSKAYA¹

¹*National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia*

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

POLYMER COATINGS AS A METHOD FOR INCREASING THE RANGE OF WETTING ANGLES OF A STEEL SUBSTRATE IN ONE-STAGE LASER PROCESSING

The paper investigates the laser structuring of systems of the "steel-polymer" type. The dependence of the contact angles of the steel substrate and the systems "steel - polymethyl methacrylate" and "steel - MicroCoat® coating" on the fluence of laser radiation is analyzed. It is shown that, with the same parameters of laser treatment, coating a steel substrate with a polymer film makes it possible to increase the range of contact angles. The process of an autonomous gradient flow of water droplets and blood plasma on the simplest microfluidic modules has been implemented.

Метод прямой лазерной записи является быстрым, экологичным и экономичным способом модификации поверхности для управления ее свойствами, в том числе смачиваемостью [1].

В работе использовались стальные пластины марки AISI 304 размером 5x5 см и толщиной 1 мм. В качестве покрытий использовались полиметилметакрилат (ПММА), толщиной порядка 4 мкм и покрытие MicroCoat® с толщиной покрытия порядка 1 мкм. Структурирование поверхности проводилось на открытом воздухе с помощью иттербиевого волоконного лазера MiniMarker2 с длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм. Описание метода обработки поверхности аналогично приведенному в работе [1].

Краевые углы смачивания измерялись на тензиометре DSA 100 KRÜSS с использованием метода лежащей капли [2].

В работе представлены данные углов смачивания для стальной подложки без покрытия, покрытой пленкой ПММА, и с пленкой MicroCoat® при изменении плотности энергии лазерного излучения в диапазоне от 1,4 Дж/см² до 14 Дж/см². Оптимальные параметры обработки образца зависели от характеристик покрытия.

В работе показано, что использование полимерного покрытия позволяет расширить диапазон углов смачивания и создать структуры для автономного направленного движения жидкостей. В качестве жидкостей исследовались дистиллированная вода и плазма крови. Было показано, что изменяя плотность энергии лазерного излучения можно управлять скоростью и направлением течения жидкостей. Максимальная скорость течения капли воды на системе «сталь – полиметилметакрилат» составила ≈ 25 мм/с. На системе «сталь - MicroCoat® покрытие» максимальная скорость достигала ≈ 90 мм/с.

Таким образом, модули могут найти применение в различных отраслях промышленности как для сбора воды, так и в качестве защитных покрытий от запотевания и обледенения. В медицине модуль может интегрироваться в состав одноразового картриджа экспресс тестов биологических жидкостей.

Список литературы

1. Krylach I. V., Kudryashov S. I., Olekhovich R. O., Moskvina M. K., Uspenskaya M. V. // Laser Phys. Lett. 2019. Vol.16 №10 105602.
2. Krylach I. V., Kudryashov S. I., Fokina M. I., Sitnikova V. E., Olekhovich R. O., Moskvina M. K., Shchedrina N. N., Gonchukov S. A., Odintsova G. V., Uspenskaya M. V. // Laser Phys. Lett. 2020 Vol. 17 №8 085602.

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 НЕОДНОРОДНЫХ СВЕТОВОДАХ

Исследовалась генерация последовательностей ультракоротких импульсов из квазинепрерывной модулированной волны, которая происходит в результате индуцированной модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейных волоконных световодах с различными профилями зависимостей дисперсии от длины

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 INHOMOGENEOUS LIGHT GUIDES

We investigated the generation of sequences of ultrashort pulses from a quasi-continuous modulated wave, which occurs as a result of the induced modulation instability of wave packets propagating in nonlinear optical fibers with different profiles of dispersion on length.

Модуляционная неустойчивость (МН) – эффект, характерный для многих нелинейных систем, возникающий в результате совместного действия нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

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

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{d_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} - i \frac{d_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial \tau^3} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_n = (d^n \beta / d\omega^n)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр нелинейности.

На рис. 1 приводятся зависимости максимума модулированной волны вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + 0.01 \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)] \quad (2)$$

полученные путем численного решения уравнения (1) методом SSF [1].
При следующих значениях параметров: начальной мощности $P_0 = 1$ Вт,

длине световода $L=1000$ м, начальной ДГС $d_{20} = -10^{-26}$ $\text{с}^2/\text{м}$, дисперсии на выходе из световода $d_2(L)/d_{20} = 0.1$, дисперсии высшего порядка $d_3 = -3 \cdot 10^{-41}$ $\text{с}^3/\text{м}$, параметре нелинейности $R = 10^{-2}$ $(\text{Вт} \cdot \text{м})^{-1}$, частоте модуляции $\Omega_{\text{mod}} = \sqrt{2\gamma P_0 / |d_{20}|}$ и при $d_2(z)/d_{20} = \exp(-b_e z); (1-b_l z); (1+b_h z)^{-1}; \exp(-b_g z^2); (1-b_p z^2)$ – кривые (1;2;3;4;5).

Из зависимостей на рис. 1 видно, что наибольшие степени сжатия генерируемых импульсов достигаются при плавно убывающих по модулю зависимостях дисперсии: линейной, гауссовой и параболической. При этом почти на всей длине световода максимальная степень сжатия достигается при гауссовом профиле дисперсии, уступая параболическому профилю лишь на выходе из световода, когда при таком профиле происходит резкий рост пиковой мощности.

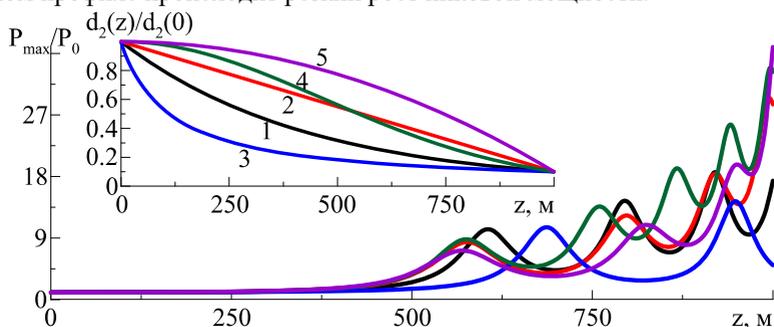


Рис. 1. Нормированные продольные зависимости дисперсии (верх. рис.) и максимума модулированной волны (нижн. рис.), для зависимостей дисперсии: $d_2(z)/d_{20} = \exp(-b_e z); (1-b_l z); (1+b_h z)^{-1}; \exp(-b_g z^2); (1-b_p z^2)$ – кривые (1;2;3;4;5).

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №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.

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

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

ДИНАМИКА ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В УСЛОВИЯХ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Рассмотрено формирование ультракоротких лазерных импульсов в цилиндрическом световоде из квазинепрерывной фоновой туннелирующей волны типа моды шепчущей галереи (МШГ).

I. O. ZOLOTOVSKI, V. A. LAPIN, D. I. SEMENTSOV
*Ulyanovsk State University, S.P. Kapitsa Research Institute of Technology,
Ulyanovsk, Russia*

DYNAMICS OF FREQUENCY-MODULATED WAVE PACKETS UNDER CONDITIONS OF SYNCHRONIZED INTERACTION WITH A RUNNING WAVE REFRACTIVE INDICATOR

The formation of ultrashort laser pulses in a cylindrical fiber from a quasi-continuous background tunneling wave of the type of a whispering gallery mode (WGM) is considered.

Если свет вводится в волновод под некоторым углом к образующей цилиндра, то поверхностная волна распространяется по спиральной траектории [1]. Схематически призмный ввод и вывод излучения представлен на рис. 1.

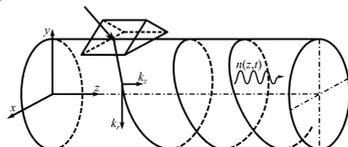


Рис. 1. Траектория луча в цилиндрическом световоде, вводимого через призму и представляющего волну типа МШГ [1, 2]

Пусть в световоде распространяется еще БВПП, тогда показатель преломления среды изменяется по закону:

$$n(t, z) = n_0 [1 - b \cos(\Omega t - qz)] \quad (3)$$

где Ω – частота модуляции, $q = 2\pi / \Lambda$ – волновое число БВПП, $b = \Delta n / n_0$ – глубина модуляции ПП, Δn – максимальное изменение ПП.

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [2, 3]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2}{2\gamma} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR\gamma^{-1} |A|^2 A = ikb\gamma^{-1} \cos[\Omega(\tau - \delta\tau)] A, \quad (4)$$

где $d_2 = (d^2 \beta / d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр нелинейности, – параметр продольного замедления волны.

На рис. 2 приводятся профили слабомодулированной волны вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + 0.01 \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)] \quad (5)$$

полученные путем численного решения уравнения (1) методом SSF [1]. При значениях параметров: $\Omega = 10^9 \text{ с}^{-1}$, $q = 10^6 \text{ м}^{-1}$, $\gamma = 4 \cdot 10^5$, $b = 10^{-4}$, начальной мощности $P_0 = 0.1 \text{ Вт}$, ДГС $d_2 = -10^{-26} \text{ с}^2/\text{м}$, $R = 10^{-2} (\text{Вт} \cdot \text{м})^{-1}$, частоте модуляции $\Omega_{\text{mod}} = \sqrt{2RP_0 / |d_{20}|}$.

Из рис. 2 видно, как происходит процесс стягивания бризеров к областям максимума показателя преломления БВПП и формирования высокоэнергетического импульса, на длине, определяемой

$$z_s \approx \pi |4bk\gamma^{-1} d_2 \Omega^2|^{-1/2} \quad [4]$$

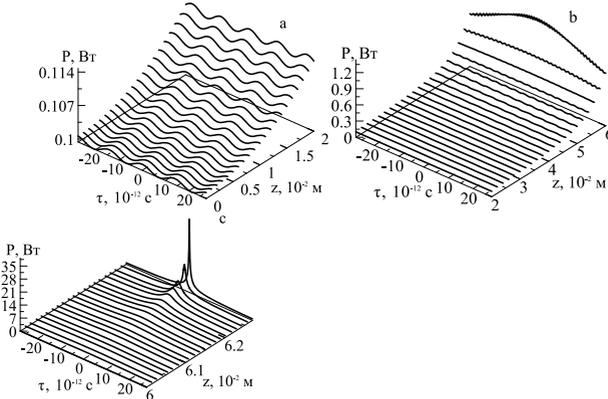


Рис. 2. Процесс формирования мощных импульсов в результате взаимодействия МШГ и БВПП на длине световода 6.3 см: начало процесса (а), формирование импульса (b) и финальное усиление импульса (с).

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-42-730013.

Список литературы

1. Сычугов В.А., Магдич Л.Н., Торчигин В.И. Квант. электроника, 31, 1089(2001).
2. Торчигин В.П., Торчигин С.В. Квант. электроника, 33, 913(2003).
3. Золотовский И.О., Коробко Д.А., Лапин В.А., Миронов П.П., Семенцов Д.И., А. А. Фотиади, Явтушенко М.С. Квантовая электроника 48 (9), 818 (2018).

В.В. БАЛАШОВ¹, В.В. БЕЗОТОСНЫЙ², Л.Ю. ЗАХАРОВ¹,
А.В. ИНЮШКИН⁵, А.Ю. КАНАЕВ³, А.Б. КОЗЛОВ⁴, С.М.
КОЗЛОВА¹, А.Л. КОРОМЫСЛОВ², К.В. ЛОПУХИН¹, В.А.
ЛУЗАНОВ¹,
К.С. ПЕРВАКОВ², И.М. ТУПИЦЫН², Д.А. ЧЕРНОДУБОВ⁵,
А.Е. ЧЕШЕВ²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им.

В.А.Котельникова РАН, Московская обл., Фрязино, пл. Введенского, 1

² Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Ленинский просп., 53

³ ФКП «ГЛП «Радуга», Владимирская обл., 600910 Радужный, а/я 771

⁴ АО «НИИ «ПОЛЮС» ИМ. М.Ф.СТЕЛЬМАХА», Москва, ул. Введенского, д. 3,
корп. 1

⁵ НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова,
д. 1

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННОЙ УВ (3+) ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ LUYAG: ОПТИЧЕСКИЕ, СТРУКТУРНЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ СВОЙСТВА

Исследованы основные свойства легированной иттербием лютеций-иттрий
алюминиево-гранатовой керамики с различными соотношениями замещения
лютеция и иттрия ($x=0-1$).

V.V. BALASHOV¹, V.V. BEZOTOSNIY², L.YU.

ZAKHAROV¹,

A.V. INYUSHKIN⁵, A.YU. KANAEV³, A.B. KOZLOV⁴, S.M.
KOZLOVA¹, A.L. KOROMYSLOV², K.V. LOPUKHIN¹, V.A.

LUZANOV¹,

K.S. PERVAKOV², I.M. TUPITSYN², D.A. CHERNODOUBOV⁵,
E.A. CHESHEV²

¹ Kotelnikov's IRE, RAS, Fryazino, Moscow region, Russia

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

³ SLPG 'Raduga', FSE, Radyzhnyi, Vladimir region, Russia

⁴ AO Stelmakh Polyus Res Inst, Moscow, Russia

⁵ National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

COMPARATIVE STUDY OF YB (3+) DOPED LUYAG LASER CERAMIC: OPTICAL, STRUCTURE AND LASING PROPERTIES

Main properties of ytterbium doped lutetium-yttrium aluminum garnet ceramics with different ratios of lutetium to yttrium substitution ($x=0-1$) are investigated.

Для мощного лазера необходимы материалы с высокими термомеханическими свойствами. Одним из таких материалов является лютеций-алюминиевый гранат (LuAG), легированный иттербием. Он выгодно отличается от иттрий-алюминиевого граната (YAG) главным образом незначительным снижением теплопроводности с увеличением уровня легирования иттербием [1]. В данной работе исследованы основные свойства керамики $(Lu_xY_{1-x})AG:Yb^{3+}$ с различным соотношением лютеция к иттрию ($x=0-1$) для поиска оптимальных составов лазерных элементов.

Для всех образцов в качестве агломерационных добавок использовались SiO_2 , B_2O_3 и MgO . Керамические образцы были получены твердотельным реактивным спеканием в вакууме. В качестве исходных материалов использовали осажденные Y_2O_3 и Yb_2O_3 , а также коммерчески доступные Lu_2O_3 , Al_2O_3 и $Mg(NO_3)_2$. Исходные порошки смешивали в стехиометрических пропорциях и измельчали в планетарной мельнице в безводном спирте в течение 15 часов. Порошковые смеси подвергали одноосному прессованию при 100 МПа, затем укупоривали при 250 МПа и прокаливали при 1000оС для удаления всех органических материалов. Таблетки спекали в вакуумной печи с вольфрамовыми нагревателями при температуре 1750-1800оС в течение 8 часов. Окончательно спеченные керамические образцы отжигали при 1300оС в течение 10 часов для удаления кислородных вакансий и изменения степени окисления ионов иттербия с +2 до +3. Все образцы $Yb:LuYAG$ были отшлифованы и отполированы до зеркального блеска с обеих сторон с использованием алмазных абразивов. Толщина образцов после механической обработки составила 1 мм. Для измерения генерационных характеристик были изготовлены дисковые элементы.

Измерены спектры оптического пропускания отожженных и не отожженных образцов, кривые усадки, размеры зерен в зависимости от температуры спекания и состава образцов, характеристики генерации и температурная зависимость теплопроводности. На основе полученных результатов был предложен и обсужден оптимальный состав.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-52-00036.

The reported study was funded by RFBR and BRFFR, project number 20-52-00036.

Список литературы

1. Kolja Beil, Susanne T. Fredrich-Thornton, Friedjof Tellkamp, Rigo Peters, Christian Kränkel, Klaus Petermann, and Günter Huber Vol. 18, No. 20, 2010, OPTICS EXPRESS 20712.

В.К. ШЕЛЕГ, Н.И. ЛУЦКО, А.С. ЛАПКОВСКИЙ
Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА
НАПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРОМ ВАЛИКОВ ИЗ
НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА И БРОНЗЫ НА
МИКРОТВЕРДОСТЬ**

В статье исследуется изменение элементного состава и микротвердости по глубине наплавленных лазером валиков из сплава на основе никеля и бронзы. Показано, что изменение содержания никеля и железа по глубине соответствующих валиков непосредственно влияет на изменение величины микротвердости

V.K. SHELEG, N.I. LUTSKO, A.S. LAPKOVSKIJ
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**INFLUENCE OF ELEMENTAL COMPOSITION OF NICKEL
AND BRONZE TRACKS CLADDED BY LASER ON
MICROHARDNESS**

The article investigates the change in the elemental composition and microhardness along the depth of the deposited tracks made of an alloy based on nickel and bronze. It is shown that the change in the content of nickel and iron along the depth of the corresponding tracks directly affects the change in the value of microhardness.

Уникальные свойства лазерной наплавки позволяют создавать с ее помощью мультимодальные покрытия [1], модами которых являются разнородные металлические материалы. Исследование свойств валиков из этих материалов весьма актуально для обеспечения качества мультимодальных покрытий.

В данной работе предпринята попытка исследовать распределение микротвердости и элементного состава по глубине валиков из никелевого сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Единичные валики наносились на образцы из стали 45 на технологическом комплексе, оснащенном CO₂ лазером непрерывного действия. Лазерная наплавка производилась при мощности излучения 1000 Вт, с различными скоростями наплавки.

Исследования элементного состава и микротвердости по глубине валиков выполнялись на микрошлифах поперечного сечения,

соответственно, на микроскопе «Mira» фирмы «Oxford Instruments» (Великобритания) и микротвердомере ПМТ-3.

Изменение микротвердости по глубине валика из сплава ПГ-12Н-01 связано непосредственно с изменением в этом же направлении элементного состава материала валика. Из рис. 1 видно, что элементный состав наплавленного валика сильно отличается от состава исходного порошка никелевого сплава ПГ-12Н-01. Материал валика уже не является чисто никелевым сплавом. Диффузия железа из основы приводит к тому, что его содержание по глубине валика изменяется от 65 до 52 % (в исходном порошке около 2 %). Величина микротвердости в валике, поэтому не превышает 2700 МПа. Распределение микротвердости по глубине валика определяет содержание никеля в соответствующих точках. Из рис. 1 видно, что увеличение содержания никеля от основы к поверхности с 27 до 42 % приводит к росту микротвердости с 2102 до 2680 МПа.

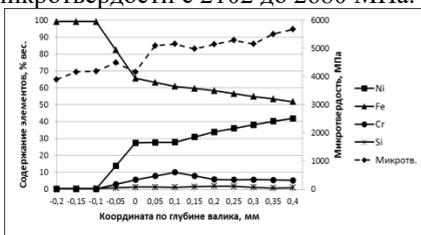


Рис. 1. Распределение элементов и микротвердости по глубине валика из сплава ПГ-12Н-01

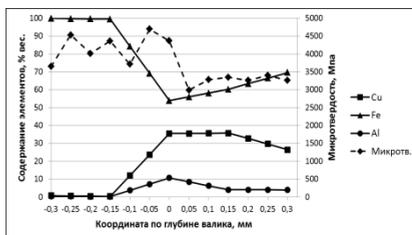


Рис. 2. Распределение элементов и микротвердости по глубине валика из бронзы ПГ-19М-01

Подобное влияние элементного состава на распределение микротвердости можно наблюдать и по глубине валика бронзы ПГ-19М-01 (рис. 2). Диффузия железа из основы приводит к тому, что содержание железа и меди в валике бронзы сильно отличается от их содержания в исходном порошке бронзы ПГ-19М-01. Материал валика уже не является чистой алюминиевой бронзой. В связи со значительным содержанием железа величина микротвердости в валике бронзы достигает 3400 МПа. Содержание железа в различных точках по глубине валика и определяет соответствующую величину микротвердости (рис. 2). При увеличении количества железа от основы к поверхности с 56 до 69 %, микротвердость материала валика возрастает с 2980 до 3400 МПа.

Список литературы

1. Ratajski, J. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multilayer coatings / J. Ratajski, A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga // Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. – I. 2. – P. 35-45.

Н.П. ВАГИН., С.А. ЛЫСЕНКО, Н. Н. ЮРЫШЕВ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ СЛОЕВ ИЗ КОМПОЗИТА SI-SiC

Представлены предварительные результаты исследований по получению с помощью лазерного излучения однослойных и двухслойных образцов композита кремния и карбида кремния (Si-SiC) из исходных порошковых материалов.

Эффективность процесса спекания определялась результатами рентгеноструктурного анализа, комбинационного рассеяния и исследованиями на электронном микроскопе.

N.P. VAGIN., S. A. LYSENKO, N. N. YURYSHEV

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

LASER SINTERING OF SI-SiC COMPOSITE LAYERS

Preliminary results of studies on the production of single-layer and double-layer samples of a Si-SiC composite from initial powder materials are presented.

The efficiency of the sintering process was determined by the results of X-ray diffraction analysis, Raman scattering and electron microscopy studies.

Композит Si-SiC является одним из перспективных материалов для применения в современной промышленности (бронепластины, огнеупоры, трубы для агрессивных сред, подшипники и т.д.). Но широкое применение данного композита ограничено наличием серьезных проблем при его изготовлении [1].

В силу своих физических свойств карбид кремния (SiC) при нагревании не плавится, и спекание из него изделия заданной формы возможно только через организацию многостадийного процесса с различными температурными режимами, закачивающегося химической реакцией синтеза углерода и кремния.

Применение лазерного излучения для спекания Si-SiC позволяет отказаться от использования высокотемпературных печей и организовать процесс формирования таких композитных изделий благодаря управлению тепловым нагревом в каждой точке воздействия.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов образцов из Si-SiC, спеченных с помощью лазера. При этом в различных средах (вакуум, аргон, азот) варьировались составы исходной порошковой смеси и режимы излучения.

При осмотре полученных образцов на электронном микроскопе подтвердилось наличие мостиков из вторичного SiC между исходными частицами SiC и образующих таким образом вместе с ними прочный каркас (на рис. 1 некоторые мостики показаны стрелками).

Проведены эксперименты по формированию многослойного образца. Результат спекания двух слоев представлен на рис.1. Обнаружены области (одна под цифрой 2), в которых не видна граница между слоями.

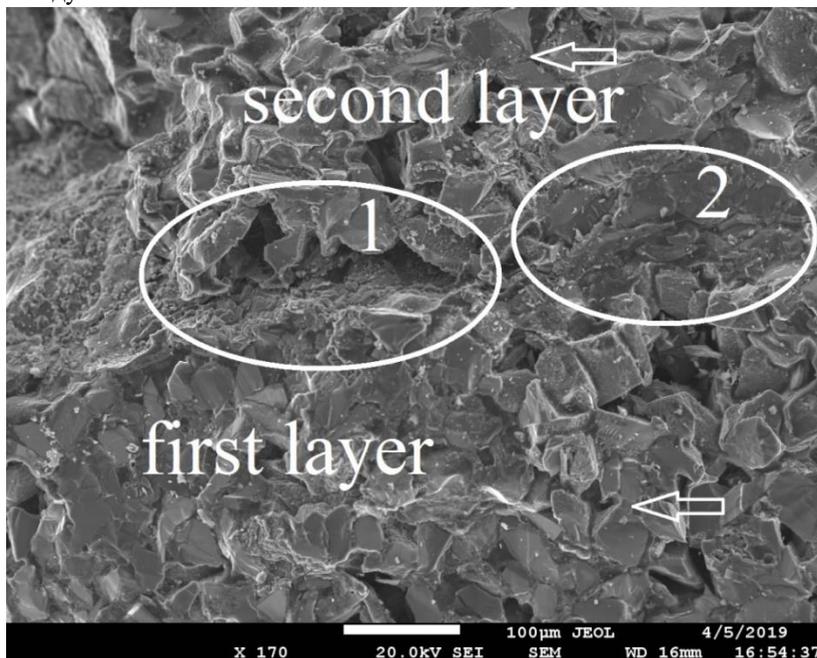


Рис 1. Вид излома двух слоев SiC при увеличении в 170 раз, (фото с электронного микроскопа) после травления в кислоте для удаления Si. Данные результаты показывает возможность использовать лазерное излучение для послойного спекания изделий из композита Si-SiC и проведения таких работ, как ликвидация трещин или отверстий, сварка без нагрева всего остального изделия, что может быть чрезвычайно важно при работе с емкостями для опасных или вредных веществ.

Список литературы

1. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. Шишковский И.В. М.: Физматлит, 2009.- 424с

А.Н. МАРЕСЕВ, М.А. ШЕВЧЕНКО, Н.В. ЧЕРНЕГА, С.Ф.
УМАНСКАЯ, А.Д. КУДРЯВЦЕВА

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НЕУПОРЯДОЧЕННЫМИ НАНО- И СУБМИКРОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Рассмотрено преобразование лазерного нано и пикосекундного излучения в системах случайно распределённых наночастиц с двумя различными механизмами преобразовании начальной энергии: вынужденным комбинационным рассеянием света и люминесценцией. Измерены энергетические, спектральные, временные характеристики преобразованного излучения в зависимости от температуры в диапазоне от комнатной до температуры жидкого азота.

A.N. MARESEV, M.A. SHEVCHENKO, N.V. TCHERNIEGA, S.F.
UMANSKAYA, A.D. KUDRYAVTSEVA

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

INTERACTION OF PULSED LASER RADIATION WITH DISORDERED NANO AND SUBMICRON SYSTEMS

The conversion of laser nano and picosecond radiation in systems of randomly distributed nanoparticles with two different mechanisms of initial energy conversion: stimulated Raman scattering of light and luminescence is considered. The energy, spectral, and temporal characteristics of the converted radiation were measured as a function of temperature in the range from room temperature to the temperature of liquid nitrogen.

В последние десятилетия воздействие лазерного излучения на неупорядоченные системы, такие как порошки, пленки, коллоидные растворы, биологические ткани, привлекает к себе внимание благодаря уникальным свойствам этих систем и особенностям их взаимодействия с электромагнитным излучением. С момента первой теоретической работы Летохова, показавшего возможность возникновения лазерной генерации в неупорядоченной системе наночастиц в начале второй половины двадцатого века, случайная генерация экспериментально была продемонстрирована в различных структурах, включая полупроводники и материалы на основе редкоземельных элементов в порошковой форме, гибридные нанокompозиты, органические красители, жидкие кристаллы и биологические ткани. Случайный лазер

представляет собой порошок активной среды с диаметром частиц от сотен нанометров до нескольких микрон. В нём отсутствует классический резонатор, его роль выполняют частицы, многократно рассеивая свет, а свойства генерации определяются взаимодействием между усилением и рассеянием. Таким образом система частиц выполняет функции и активной среды, и резонатора. Накачка же осуществляется лазерным источником. Среда выбирается с учетом низкого поглощения, как линейного, так и нелинейного, и высокого поперечного сечения рассеяния во всем видимом спектре.

В работе исследовались два типа неупорядоченных систем- порошок нитрата бария, в котором усиление происходило за счет вынужденного комбинационного рассеяния, и суспензия рубиновых частиц с традиционным случайным механизмом генерации за счет фотолюминесценции.

Суспензия рубиновых частиц получена методом лазерной абляции в водной среде.

Накачка изучаемых систем осуществлялась с помощью импульсов нано и пикосекундной длительности. Получены зависимости интенсивности генерации от энергии импульсов накачки для обоих временных режимов при различных температурах. Показано нелинейное увеличение интенсивности преобразованного излучения при повышении энергии импульса накачки, а также существенное увеличение эффективности преобразования при снижении температуры. Исследованы спектральные, пространственные характеристики преобразованного излучения, измерена его временная динамика.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 19-02-00750-а, № 19-02-00440-а, № 20-52-00002-Бел_а) и БРФИ (грант № 20-52-00002)

А.А. МАТРОХИН, М.А. ШЕВЧЕНКО, Н.В. ЧЕРНЕГА, А.Д.
КУДРЯВЦЕВА, С.Ф. УМАНСКАЯ

*Физический институт им. Лебедева Российской академии наук, Москва,
Россия*

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НА НАНО И СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУРАХ

В работе приведены результаты экспериментальных работ по изучению характеристик излучения второй гармоники на системах нано и субмикронных частиц ниобата лития. Исследованы спектральные, энергетические и временные характеристики излучения второй гармоники при возбуждении импульсами нано и пикосекундного диапазонов длительности. Получены зависимости данных характеристик от условий возбуждения при температурах от комнатной до температуры жидкого азота.

A.A. MATROKHIN, M.A. SHEVCHENKO, N.V. TCHERNIEGA,
A.D. KUDRYAVTSEVA, S.F. UMANSKAYA

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

SECOND HARMONIC GENERATION IN NANO AND SUBMICRON STRUCTURES

This paper presents the results of experimental studies on the characteristics of second harmonic radiation on systems of nano and submicron lithium niobate particles. The spectral, energy, and temporal characteristics of the second harmonic radiation upon excitation by pulses of the nano and picosecond ranges of duration have been investigated. The dependences of these characteristics on the excitation conditions at temperatures from room temperature to the temperature of liquid nitrogen are obtained.

Эффект генерации второй гармоники при воздействии лазерного излучения на системы наночастиц исследовался многими авторами. В работе [1] исследовалась генерация второй гармоники в неупорядоченной среде в виде наноразмерного порошка ниобата лития, где было показано возможное влияние Андерсоновской локализации на эффективное преобразование излучения. Изучение особенностей нелинейных взаимодействий в подобных неупорядоченных системах представляет большой интерес как с фундаментальной точки зрения, так и для возможных многочисленных практических применений.

В работе экспериментально исследовались характеристики излучения второй гармоники, возбужденного в нано и субмикронных частицах кристалла ниобата лития. Для возбуждения использовались

лазерные импульсы нано и пикосекундной длительности с длиной волны 1064нм.

Нано и субмикронные частицы ниобата лития были получены методами лазерной абляции и механического помола.

Обнаружено существенное увеличение эффективности преобразования излучения во вторую гармонику при замораживании водной суспензии частиц.

Зависимость интенсивности второй гармоники от энергии накачки носит нелинейный характер.

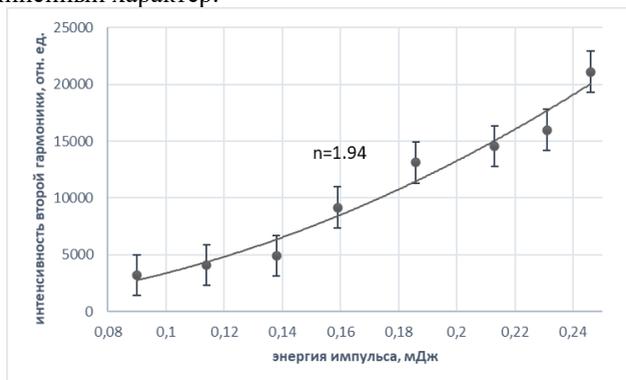


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения второй гармоники от энергии возбуждающих лазерных импульсов длительностью 11нс для замороженной водной суспензии монодисперсных частиц. n – степень полинома

С помощью стрик-камеры измерена временная динамика генерации второй гармоники для образцов и при различных условиях возбуждения (длительность импульса, температура).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 19-02-00750-а, № 19-02-00440-а, № 20-52-00002-Бел_а) и БРФФИ (грант № 20-52-00002)

Список литературы

[1] Qiao, Y., Ye, F., Zheng, Y., & Chen, X. (2019). Cavity-enhanced second-harmonic generation in strongly scattering nonlinear media. *Physical Review A*, 99(4), 043844

Н.В. МИНАЕВ¹, Е.О. ЕПИФАНОВ¹, А.А. АНТОШИН^{1,2}, Е.А.
МИГАЛЬ³

¹*Институт фотонных технологий ФНИЦ "Кристаллография и фотоника"
РАН, Троицк, Москва, Россия*

²*Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский
Университет), Москва, Россия*

³*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ДВУХФОТОННАЯ МИКРОСТЕРЕОЛИТОГРАФИЯ И БИОПЕЧАТЬ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРОИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ

В докладе представляются результаты разработки лазерных технологий формирования функциональных тканеинженерных конструкций для восстановления костной ткани. Будут представлены результаты формирования трехмерных биосовместимых структур с помощью метода двухфотонной фемтосекундной полимеризации из биосовместимых полимерных материалов на основе алифатических полиэфиров с использованием методики пространственно-временной фокусировки лазерного излучения. Будут представлены результаты адаптации технологии лазерной печати методом прямого лазероиндуцированного переноса под печать клеточными сфероидами.

N.V. MINAEV¹, E.O. EPIFANOV¹, A.A. ANTOSHIN^{1,2}, E.A.
MIGAL³

¹*Institute of Photonic Technologies, Federal Research Center "Crystallography and
Photonics", Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia*

²*First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov, Ministry of
Health of Russia (Sechenovskiy Universitet), Moscow, Russia*

³*Moscow State University M. V. Lomonosov, Faculty of Physics, Moscow, Russia*

FEMTOSECOND TWO-PHOTON MICROSTEREOLITOGRAPHY AND BIOPROPRINTING BY LASER INDUCED FORWARD TRANSFER FOR BONE TISSUE REGENERATION

The report presents the results of development laser additive technologies for the formation of functional tissue-engineered structures for the regeneration of bone tissue. The results of the formation of three-dimensional biocompatible structures using the method of two-photon femtosecond polymerization from biocompatible polymer materials based on aliphatic polyesters using the technique of simultaneous spatiotemporal focusing of laser radiation will be presented. The results of adaptation

of laser printing technology by the method of laser-induced forward transfer for printing with cellular spheroids will be presented.

Представляемая работа посвящена разработке подходов к формированию тканевых эквивалентов для персонализированной регенеративной медицины с использованием лазерных аддитивных технологий.

В процессе выполнения работы, была разработана оптическая схема для осуществления пространственно-временной фокусировки лазерного излучения, англ. simultaneous spatiotemporal focusing (SSTF). Исходно, в установке используется излучение второй гармоники фемтосекундного лазера ТЕМА-100 (Авеста проект, Россия) с длиной волны $\lambda = 525$ нм, длительностью импульса около 200 фс, частотой генерации 80 МГц. Для реализации процесса пространственно-временной фокусировки лазерного излучения необходимо пропустить излучение через две оптические схемы – стретчер (экспандеер), задачей которого является временное растягивание импульса по спектру (чирпированный импульс) и компрессор, который обеспечивает сжатие чирпированного импульса в фокусе микроскопического объектива, используемого для фокусировки. Полученное на выходе из оптической системы лазерное излучение заводилось в оптический тракт установки лазерного микроструктурирования для проведения процесса формирования трехмерных структур из биосовместимых материалов [1]. Параметры лазерного излучения и оптической схемы допускают использование объективов с малой числовой апертурой NA 0.1 - 0.2, обладающих большим рабочим полем, что позволяет формировать трехмерные структуры сантиметрового масштаба.

Отработана методика лазерной печати клеточными сфероидами с помощью методики прямого лазероиндуцированного переноса [2]. Отработаны режимы лазерной печати с использованием стерильного гидрогеля на основе высокомолекулярной гиалуроновой кислоты содержащие клеточные сфероиды на сформированные методом двухфотонной полимеризации трехмерные структуры с развитой поверхностью, которые показали принципиальную возможность процесса успешного переноса сфероидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-75-00108).

Список литературы

1. Епифанов Е.О., Тимашев П.С., Фалетров Я.В., Пискун Ю.А., Костюк С.В., Минаев Н.В., Бардакова К.Н. 3D-Печать Тетрафункционального Полилактида С Использованием Производных Ципрофлоксацина В Качестве Фотоинициаторов // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая. - 2020. - Vol. 84 - № 11. - P. 1652–1656.

2. Yusupov V., Churbanov S., Churbanova E., Bardakova K., Antoshin A., Evlashin S., Timashev P., Minaev N. Laser-induced Forward Transfer Hydrogel Printing: A Defined Route for Highly Controlled Process // *Int. J. Bioprinting*. - 2020. - Vol. 6 - № 3. - P. 1–16.

М.К. МОСКВИН, Д.С. ЮЖАКОВА, Н.А. АФАНАСЬЕВ,
Е.В. ПРОКОФЬЕВ, Д.А. СИНЕВ, Г.В. ОДИНЦОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫМ ЦВЕТОМ

В работе продемонстрирован способ структурной окраски поверхности металлов за счет формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) при воздействии лазерного излучения наносекундной длительности с длиной волны 1,06 мкм. Были получены одномерные и двумерные структуры периодом порядка 1 мкм на поверхности нержавеющей стали и пленок титана, а так же структуры с непрерывным изменением ориентации ЛИППС при лазерном сканировании по различным траекториям.

M.K.MOSKVIN, D.S. YUZHAKOVA, N.A. AFANASEV, E.V.
PROKOFEV, D.A. SINEV, G.V. ODINTSOVA
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

FORMATION OF LASER-INDUCED PERIODIC SURFACE STRUCTURES FOR STRUCTURAL COLORING

This work demonstrates a method of structural coloring of the metal surface by formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) under the exposure of nanosecond laser radiation with a wavelength of 1.06 μm . One-dimensional and two-dimensional structures with a period of about 1 μm were obtained on the surface of stainless steel films and titanium, as well as structures with a continuous change in the orientation of the LIPSS during laser scanning along various trajectories.

Появление лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) как универсальный эффект было ранее продемонстрировано на всех типах материалов: металлах, полупроводниках и диэлектриках [1]. Формирование данных структур происходит в периодически модулированном световом поле в области фокусировки лазерного излучения. Данное явление обычно связывают с интерференцией между падающей электромагнитной волной и возбуждаемой поверхностной электромагнитной волной [2]. Масштабы формируемых структур имеют размерность равную длине волны воздействующего излучения. С точки зрения практического применения данное структурирование может применяться в создании элементов фотоники. Также возможно использование ЛИППС как элементов защитных знаков и дифракционной оптики и в

формировании структурного цвета в технологии цветной маркировки. В большинстве известных работ ЛИППС для различных применений получают под воздействием ультракоротких лазерных импульсов, однако в данной работе продемонстрировано формирование структурного цвета за счет структурирования волоконным наносекундным лазером.

Для формирования структурного цвета в настоящей работе проведено исследование характера формирования ЛИППС короткими лазерными импульсами на поверхности нержавеющей стали и пленок титана. Генерация ЛИППС производилась при помощи волоконного иттербиевого лазера IPG Photonics ($P_c=20$ Вт, $\lambda=1064$ нм, $f=1,6 - 99$ кГц).

Во всех случаях направление структур было поляризационно зависимым, при повторном воздействии в случае формирования структур под воздействием температурного поля ниже температуры плавления на пленках титана происходило формирование двухмерных решеток. В случае температурного поля выше температуры плавления на стали AISI 304 происходила перестройка направления структур, что позволяет записывать одномерные микроструктуры, плавно изменяющие свое направление с ходом линейного сканирования по поверхности. Показано, что зависимость ориентации ЛИППС от поляризации лазерного излучения дает возможность формировать элементы с различными типами структур. В результате разные типы и ориентации ЛИППС отображаются определенным структурным цветом при их освещении монохроматическим светом.

Таким образом, в работе при помощи наносекундного лазерного воздействия на поверхности стали и пленок титана были созданы различные типы ЛИППС порядка 1 мкм. При освещении структур монохроматическим светом наблюдались яркие структурные цвета, охватывающие весь видимый спектр. При настройке пространственной ориентации ЛИППС за счет поляризации лазерного излучения были записаны несколько изображений в одной области, отображающиеся только при определенном угле наблюдения. Настоящие результаты открывают новые возможности к эффективному созданию элементов структурной окраски металлических поверхностей.

Работа поддержана грантом РФФ 17-19-01721-П.

Список литературы

1. Bonse, J., & Lasagni, A. F. (2020). Laser micro- and nano-material processing–Part 1. *Advanced Optical Technologies*, 9(1-2), 7-9.
2. Florian, C., Kirner, S. V., Krüger, J., & Bonse, J. (2020). Surface functionalization by laser-induced periodic surface structures. *Journal of Laser Applications*, 32(2), 022063.

С.П. НИКИТИН¹, А.В. ШУТОВ², В.Д. ЗВОРЫКИН²

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ИНФРАКРАСНОЙ КОНИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ФИЛАМЕНТОВ ГИГАВАТТНЫХ УФ ИМПУЛЬСОВ В КСЕНОНЕ

При распространении УФ филаментов с длиной волны 248 нм в ксеноне (Xe) генерируется узкополосная монохроматическая ИК коническая эмиссия (ИК КЭ). Мы исследовали временную динамику данной ИК КЭ при распространении филаментированных УФ импульсов в Хе.

NIKITIN S.P.¹, SHUTOV A.V.², ZVORYKIN V.D.²

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

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

INVESTIGATION OF THE TIME DYNAMICS OF INFRARED CONICAL EMISSION DURING THE PROPAGATION OF GIGAWATT UV PULSE FILAMENTS IN XENON

When UV filaments with a wavelength of 248 nm propagate in Xe, narrow-band monochromatic IR conical emission (IR CE) is generated. We investigated the temporal dynamics of this IR CE during the propagation of filamented UV pulses in Xe.

В работе [1] предполагается, что основным возможным механизмом возникновения ИК КЭ является параметрическое преобразование излучения (четырёхволновое смешение или ЧВС), а также получен спектр генерируемой ИК КЭ. В спектре наблюдаются две узкие линии на 828 и 823 нм, имеющие спектральную ширину 0.25-0.3 нм. Подобная ширина спектра в перерасчете на длительность импульса не может объясняться ЧВС и характерна для усиленного спонтанного излучения (УСИ) в Хе, в связи с чем и возникла необходимость провести исследование, описанное ниже.

Импульс третьей гармоники титан сапфирового лазера усиливался так, что на выходе из усилителя получались импульсы с длительностью 200 фс и мощностью около 500 P_{cr} самофокусировки в воздухе для

248нм. В таком импульсе развивалась множественная филаментация излучения. При распространении в ячейке с Хе при давлении газа $P=1.1$ атм. филаменты генерировали ИК излучение, дальняя зона которого представляла из себя набор колец. Изображение эмиссии от одного-трех филаментов строилось на фотокатод ЭОК. Как видно из рис.1, имеется несколько временных компонентов ИК излучения: быстрая, с фронтом нарастания ~ 2 пс, связанная с ЧВС, за которой следует спад за время ~ 10 пс, вероятно, связанный с УСИ в Хе. После этого с задержкой ~ 10 пс возникает второй импульс излучения с длительностью около ~ 30 пс, одной из возможных причин появления которого является формирование эксимеров Хе₂ и их последующее спонтанное излучение.

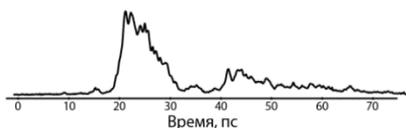


Рис. 1. Временная динамика ИК КЭ в Хе при давлении 1.1 атм

Список литературы

1. I. V. Smetanin, A. V. Shutov, N. N. Ustinovsii, V. D. Zvorykin, A. V. Bogatskaya, A. M. Popov, «Monochromatic conical IR emission from decaying KrF laser filaments in xenon as coherent stimulated four-wave mixing process», MDPI, 2020.

М.В. АНТИПОВ, Д.А. ПОЛШКОВ

*Саровский физико-технический институт – филиал Национального
исследовательского ядерного университета МИФИ, Саров, Россия*

МЕТОД ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛЬНЫХ СВЕТОВЫХ ПОМЕХ

Рассмотрена проблема световой засветки при регистрации пылевых потоков методом теневой фото-регистрации, при проведении взрывных экспериментов. Предложены пути решения по устранению данной проблемы. Проведен ряд экспериментов, подтверждающих возможность использования метода цифровой голографии в условиях сильных световых помех и получения качественных изображений. Использование голографического метода дополнительно позволяет устранить проблему глубины резкого изображения.

M.V. ANTIPOV, D.A. POLSHKOV,

*Sarov Physical & Technical Institute - National Research Nuclear University
MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia*

DIGITAL HOLOGRAPHY METHOD FOR RECORDING DUST FLOWS IN THE PRESENCE OF STRONG LIGHT INTERFERENCE

The problem of light exposure during the registration of dust flows by the method of shadow photo-registration, during explosive experiments, is considered. The ways of solving this problem are suggested. A number of experiments confirming the possibility of using the digital holography method in conditions of strong light interference and obtaining high-quality images were carried out. The use of the holographic method additionally eliminates the problem of the depth of the sharp image.

Достаточно часто, при регистрации, каких либо быстропротекающих процессов, с помощью современных камер, с различными вариантами матриц (ПЗС и КМОП) сталкиваются с проблемой световой засветки изображения, что делает его невозможным для обработки и получения нужных данных с эксперимента. В нашем случае, световая засветка является достаточно актуальной и часто встречающейся проблемой, от которой следует уходить, по причине невозможности исследования тех или иных взрывных процессов или исследования микрочастиц.

Наиболее простым в использовании и малотребовательным к качеству лазерного излучения и разрешению голографической среды

является метод осевой голографии Фраунгофера [1], что делает его удобным для ре-гистрации быстродвижущихся микрообъектов (частиц), в том числе во взрывных экспериментах.

Предлагаемый метод устранения шумовой засветки состоит в следующем. Пучок света, выходящий из лазера, пройдя через расширитель пучка, падает на регистрируемый объект, имеющий прозрачность не менее 80%. Прошедшее излучение попадает в объектив, передающий изображение объекта с требуемым увеличением на цифровую матрицу скоростной фотокамеры. Между объективом и камерой располагается, по крайней мере, один полосовой фильтр, пропускающий только излучение с длиной волны лазерного пучка. Световые шумы создавали с помощью расположенных вблизи от фокуса оптической системы лампы накаливания, взрывающейся проволоки, лампы-вспышки, а так же яркого света от взрыва аргона.

Предложенный метод подавления световых шумов использует схему осевой голографии Фраунгофера. Поэтому получаемые изображения являются голограммами, и это позволяет восстановить изображения объектов находившихся в момент регистрации вне плоскости резкого изображения оптической системы.

Список литературы

1. Под.ред. Г. Колфилда, - Оптическая голография: Пер. с англ./.- М.:Мир, 1982-1г.

А.Г. ПУТИЛОВ^{1,2}, А.А. АНТИПОВ^{1,2}, А.Е. ШЕПЕЛЕВ¹,
А.В. ОСИПОВ^{1,2}

¹ *Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура, Россия*

² *Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г.
Столетовых, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ, СПЕКТРАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНОГО ЛАЗЕРА НА АЛЕКСАНДРИТЕ

Рассмотрено влияние температуры кристалла александрита на его люминесцентные и генерационные характеристики. Продемонстрирована перестройка спектра выходного излучения в длинноволновую область при повышении температуры. Проведен анализ энергетических уровней кристалла александрита. Экспериментально изучено влияние базы резонатора и коэффициента отражения выходного зеркала на энергию излучения лазера. Проведена оптимизация характеристик резонатора для достижения максимальной импульсной энергии и средней мощности.

A.G. PUTILOV^{1,2}, A.A. ANTIPOV^{1,2}, A.E. SHEPELEV¹,
A.V. OSIPOV^{1,2}

¹ *Institute on Laser and Information Technologies RAS — Branch of FSRC
«Crystallography and Photonics» RAS, Shatura, Russia*

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

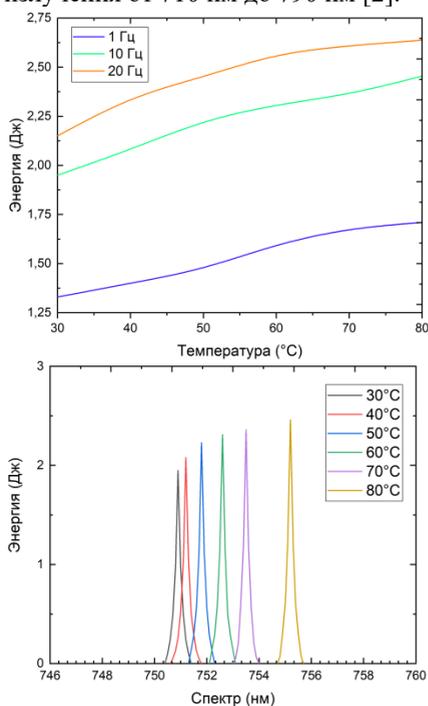
INVESTIGATION OF SPATIAL-TEMPORAL, SPECTRAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF A HIGH-POWER ALEXANDRITE LASER

The effect of the dependence of the Alexandrite crystal temperature on its luminescence and lasing characteristics is considered. The output radiation spectrum tuning to longer wavelengths with increasing temperature is demonstrated. An analysis of the energy levels of the alexandrite crystal has been carried out. The influence of the resonator base and the reflection coefficient of the output mirror on the output laser radiation energy are studied experimentally. Optimization of the resonator characteristics is realized to achieve the maximum pulse energy and average power.

Александрит ($\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$) является лазерным кристаллом с превосходными термомеханическими свойствами. Время жизни верхнего лазерного уровня при комнатной температуре составляет ~ 260

мкс. Лазер на александрите работает на вибронном переходе с широкой полосой усиления обеспечивающей непрерывную перестройку спектра излучения в области 700 – 850 нм. Широкая полоса поглощения позволяет эффективно применять как ламповую, так и диодную накачку [1].

С повышением температуры кристалла александрита происходит увеличение коэффициента усиления. Данный эффект связан с долгоживущим состоянием 2E, расположенным ниже уровня 4T2. Энергетический зазор между этими уровнями составляет всего 800 см^{-1} . Уровни 2E и 4T2 находятся в тепловом равновесии, но при повышении температуры кристалла александрита происходит тепловое заселение уровня 4T2 обеспечивающее увеличение эффективного сечения излучения. Т.о. энергия выходного излучения лазера с ростом температуры кристалла от $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $90 \text{ }^\circ\text{C}$ возрастает в $\sim 1,3$ раза (рис.1а), а спектр излучения смещается в длинноволновую область на 3 нм (рис.1б). При использовании трехступенчатого интерференционно-поляризационного фильтра Лию удалось добиться перестройки спектра излучения от 710 нм до 790 нм [2].



а

б

Рис.1. Динамика увеличения энергии и смещения спектра выходного излучения лазера на александрите с ростом температуры кристалла
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90052, частично в рамках проекта РФФИ № 19-29-10022.

Список литературы

1. A. G. Putilov et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1331 012016.
2. Антипов А.А., Путилов А.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 11. С. 1593.

А. РАМОС ВЕЛАСКЕС, Н.О. ГУДЗ, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ,
В.П. ВЕЙКО

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ПЕРЕНОС ПОЛИХРОМНЫХ МЕТОК НА ПОВЕРХНОСТЬ СТЕКЛА

Разработана методика лазерно-индуцированного переноса полихромных амплитудных меток на поверхность оптического стекла. Перенос осуществляется в процессе абляции металлической мишени, расположенной в плотном контакте с оптическим стеклом. Схема реализована на коммерческой лазерной установке «Минимаркер 2» (λ 1064, 20 Вт., 2-100 кГц, Е 1мДж, τ 4-200 нс). Проведены спектральные исследования меток, которые подтвердили формирование 5 различных цветов. Определена разрешающая способность метода и износостойкость меток.

A. RAMOS VELAZQUEZ, N.O. GUDZ, R.A. ZAKOLDAEV,
V.P. VEIKO

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

POLYCHROME LABELS ON GLASS SURFACE BY LASER- INDUCED TRANSFERING

Currently glass materials are widely used in different scientific and industrial spheres. Moreover, its high optical transmission over a wide range of wavelengths make them highly valuable in photonics, optoelectronics, bio photonics, and biomedical applications [1,2]. Laser labeling of glass is currently considered as an important operation for many completely different industries, from tools production to pharmaceuticals and jewelry needs [3]. A label on the glass provides wealth information. Accordingly, a label presents two principal aspects, the pure decorative side and the trace ability or identification of products i.e., it makes possible to include in a permanent way macro-sized images such as logotypes, graphic symbols or matrix codes of data or any other important information on a product.

Direct laser glass labeling is often characterized by low optical contrast between background and mark. Additionally, often the color of the mark is limited to black or gray shades, which offers a fairly high level of easy duplicity. This weakness is often presented when direct laser marking is employed, however, by adding some special features i.e., color shades, the level of protection against counterfeiting can be increased. In the literature laser assisted color marking of glass has been reported by adding chemical pigments and then burning it with CO₂ laser radiation [4]. On the other hand,

color marking of glass has been reported by using laser-induced plasma assisted ablation (LIPAA) [5]. However most often only one color can be obtained depending on the target material. In this paper, it is proposed to expand the color palette of labels on glass made by laser-induced forward transfer LIFT using a single target material. In particular, the formation of a color palette consisting of 5 different colors with different shades is demonstrated.

In our method polychrome marks are formed on borosilicate glass (Levenhuk G50, thickness, 1.0 mm), the target material is a commercial plate of brass (Cu65%,Fe0.2%,Zn34.8% thickness 1.5mm). Before the laser processing the glass plate was cleaned with ethanol. The substrate was irradiated by a fiber ytterbium laser pulsed with a wavelength of 1064 ns the time pulse was 100 ns and 20 kHz for the repetition rate. The laser apparatus is fitted with a galvanometer beam steering system and F-theta lens with flat-field focus of 110 mm, to allow scanning the substrate within the XY plane. Different laser scanning speeds and power values were set at 200-1000 mm/s and 1.6-3.5 W, respectively, the substrate-target distance was defined by roughness of material. In this technique the laser beam is strongly focused on the surface of a metal target that is placed on the back of the borosilicate glass plate.

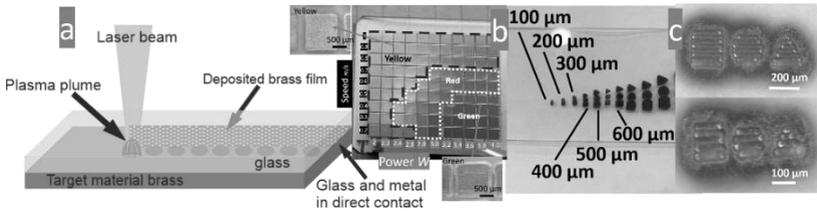


Fig. 1. a) Experimental setup. b) Polychrome marks on glass back-side surface. c) High resolution polychrome shapes on the glass.

During the process, the glass plate is located on the surface of the target material. The laser shots impact the surface of the brass and it is heated, followed by the creation of a plasma plume, the plasma encourages the interaction of the chemical components of the brass with the atmospheric glasses while transferring material onto the back surface of the glass plate mostly oxides. As a result, a thin color mark is formed on the surface of the optically transparent material, the minimal resolution of a polychrome mark is 35 μm . The polychrome marks were studied by using optical microscopy (ZEISS AXIO Imager.A1m), and spectrophotometry (LOMO SF-56). The optical images were obtained with the digital camera AxioCam ICc 3. In

conjunction with we propose an application for designing the glass surface, applying amplitude labels for the automation tasks in the field of laser processing and positioning optically transparent objects in microscopy.

Acknowledgment

The study is funded by the grant of Russian Science Foundation (project № 20-71-10103)

Список литературы

1. M. Seshadri, M. J. V. Bell, V. Anjos, and Y. Messaddeq, "Spectroscopic investigations on Yb³⁺ doped and Pr³⁺/Yb³⁺ codoped tellurite glasses for photonic applications," *J. Rare Earths*, vol. 39, no. 1, pp. 33–42, 2020, doi: 10.1016/j.jre.2019.12.006.
2. C. Pan et al., "Fabrication of micro-texture channel on glass by laser-induced plasma-assisted ablation and chemical corrosion for microfluidic devices," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 240, pp. 314–323, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.10.011.
3. V. Veiko et al., "Laser coloration of titanium films: New development for jewelry and decoration," *Opt. Laser Technol.*, vol. 93, pp. 9–13, 2017, doi: 10.1016/j.optlastec.2017.01.036.
4. K. Wesang, P. von Witzendorff, O. Suttman, and L. Overmeyer, "Local heat tempering with laser radiation for brilliant colors on glass surfaces," *J. Laser Appl.*, vol. 30, no. 3, p. 032508, Aug. 2018, doi: 10.2351/1.5040608.
5. M. H. Hong et al., "Crack-free laser processing of glass substrate and its mechanisms," in *Photon Processing in Microelectronics and Photonics*, 2002, vol. 4637, pp. 270–279.

Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, В.Н.НЕВОЛИН,
Д.В. ФОМИНСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ НАНО-ПЛАСТИНЧАТЫХ ПЛЕНОК WSe₂ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРОКАТАЛИЗА ВОДОРОДА НА ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЕ a-MoS₄/WSe₂

Исследовано влияние химического состояния тонкопленочного прекурсора WO_y на формирование морфологии нанопленок WSe₂ в процессе быстрого селенирования. Наиболее эффективное выделение водорода обнаружено для гетероструктуры a-MoS₄/WSe₂, которая содержала WSe₂ в форме кристалло-лепестков толщиной ~ 50 нм, ориентированных перпендикулярно поверхности подложки.

R.I. ROMANOV, V.Yu. FOMINSKI, V.N. NEVOLIN,
D.V. FOMINSKI

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

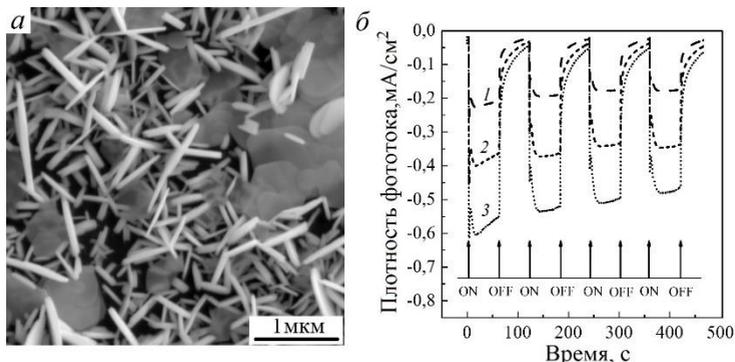
EFFECT OF THE MORPHOLOGY OF WSe₂ NANO-PLATE FILMS ON THE EFFICIENCY OF HYDROGEN PHOTOELECTROCATALYSIS ON THE HYBRID STRUCTURE a-MoS₄/WSe₂

The influence of the chemical state of the thin-film precursor WO_y on the formation of the morphology of WSe₂ nanofilms during rapid selenation is studied. The most efficient hydrogen evolution was found for the a-MoS₄/WSe₂ photocathode that contained WSe₂ in the form of petal crystals of ~ 50 nm thickness and these petals were oriented perpendicular to the substrate surface.

Получение и исследование новых наноматериалов для формирования гибридных и гетероструктур, обеспечивающих эффективное расщепление воды для получения водорода и кислорода, является одной из наиболее важных задач альтернативной энергетики. Структура a-MoS₄/WSe₂ обладает всеми необходимыми свойствами для успешного использования в фотоэлектрохимическом процессе, такими как высокий коэффициент поглощения в видимом диапазоне спектра, высокая каталитическая активность a-MoS_x, подходящее расположение электронных энергетических зон, стабильность в кислотном растворе.

В работе исследовано влияние морфологии нанослоев WSe_2 на эффективность фото-активированной реакции выделения H_2 на фотокатоде $\alpha\text{-MoS}_4/\text{WSe}_2$. Для поиска оптимальных по структуре фото-активных слоев WSe_2 проводилась термохимическая обработка в парах селена тонкопленочных прекурсоров WO_y , предварительно полученных методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО). На поверхность пленок WSe_2 также методом ИЛО наносился тонкий слой аморфного сульфида молибдена.

Поверхность образцов после селенирования была покрыта нанокристаллами чешуйчатой формы, линейные размеры которых достигали 1 мкм (рис. 1а). Установлено, что плотность образующихся вертикальных нанокристаллов WSe_2 зависит от отношения атомных концентраций O/W в исходной пленке WO_y . Наилучшие фото-электродокаталитические свойства показал образец, отличающийся наибольшей поверхностной плотностью лепестков, ориентированных



перпендикулярно поверхности (рис. 1б).

Рис. 1. а - Микро-изображение пленки WSe_2 , полученной селенированием прекурсора $\text{WO}_{2,7}$, б – хроноамперометрические кривые для $\alpha\text{-MoS}_4/\text{WSe}_2$, в которых пленки WSe_2 были получены селенированием прекурсоров $\text{WO}_{2,1}$ (1), $\text{WO}_{2,9}$ (2) и $\text{WO}_{2,7}$ (3).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 19-19-00081).

Список литературы

1. Bozheyev F., Xi F., Plate P., Dittrich T., Fiechter S., Ellmer K. // J. Mater. Chem. A 2019, Vol. 7, P. 10769-10780.

В.С. РЫМКЕВИЧ, М.М. СЕРГЕЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА НА МИКРО ОБРАБОТКУ СТЕКЛА ЛАЗЕРНО ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ

В проведенном исследовании рассмотрено влияние трека в виде цилиндрической микролинзы на поверхности стекла, образуемого в ходе его структурирования лазерно-индуцированной микроплазмой, на смещение положения перетяжки лазерного пучка. Такое смещение влияет на пятно, индуцирующее плазменный факел, что приводит к снижению эффективности и точности обработки стекла. Исследование способствует развитию представлений о влиянии воздушного зазора и положения фокальной плоскости на повышение качества обработки непрямым лазерно-плазменным методом.

V.S. RYMKEVICH, M.M. SERGEEV

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

BEAM FOCUSING INFLUENCE ON MICRO-PROCESSING OF GLASS BY LASER-INDUCED MICROPLASMA

In this study, we considered the effect of a micro-track on the glass surface, formed during a surface micro-structuring by a laser-induced microplasma, on the laser beam waist position displacement. This displacement affects the plasma plume inducing radiation spot and, as a result, reduces the efficiency and accuracy of glass processing. The study contributes to understanding the importance of experimental conditions - the air gap, the focal plane position, for improving the quality of processing by the indirect laser-plasma method.

В настоящее время при модификации стекла лазерно-индуцированными методами, такими как LIPAA [1], LIBDE [2] и лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП) [3], инициирующее излучение фокусируется на мишени, то есть генерация плазменного факела после первого импульса и образования лунки в мишени происходит в расходящемся пучке. В тоже время на поверхности образца образуется микрорельеф, способный вносить искажения в ход лазерного излучения. На данный момент вопрос о величине влияния этого микрорельефа не рассматривался, однако, при использовании короткофокусных объективов подобный эффект может оказать сильное влияние на качество и разрешающую способность лазерно-индуцированных методов обработки плазменным факелом.

В работе одна грань образца размещалась на мишени, а вторая была приподнята, образуя с ней угол в 1.37° . С помощью ЛИМП на образце было записано 3 серии треков, отличающихся энергией в импульсе (2.4 мкДж, 3.75 мкДж и 5.35 мкДж). Каждая серия состояла из 3 треков,

отличающихся положением центра перетяжки пучка, сформированным объективом $10\times$ $NA=0.5$, относительно поверхности мишени: над мишенью на расстоянии z_R (D), на поверхности мишени (F) и в мишени на глубине z_R (C). Полученные структуры были исследованы методами оптической микроскопии и профилометрии, а также контактной профилометрии.

На рисунке 1 приводится график зависимости ширины треков в стекле, записанных при различной энергии в импульсе, от зазора между мишенью и образцом при различных положениях перетяжки.

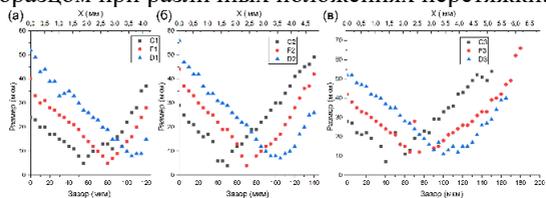


Рис. 1. Ширина треков в стекле при наличии зазора, сформированных при энергии в импульсе а) 2.4 мкДж б) 3.7 мкДж в) 5.35 мкДж

Предположим, что влияние трека на стекле на процесс обработки отсутствует. В таком случае, плазменный факел с увеличением зазора должен формировать трек, ширина которого уменьшается с увеличением зазора, что связано с ослаблением его энергии по краям факела. Однако, экспериментальные данные противоречат этому, следовательно, присутствует искажение пучка лазерного излучения, проходящего через криволинейную поверхность в виде трека – аналог цилиндрической микролинзы.

Обнаруженный эффект полезен для увеличения разрешающей способности метода, кроме того, наличие зазора позволяет более эффективно отводить частицы разрушенной мишени из области обработки, что так же увеличит энергоэффективность метода.

Список литературы

1. Sarma U., Joshi S. N. Machining of micro-channels on polycarbonate by using Laser-Induced Plasma Assisted Ablation (LIPAA) // Optics & Laser Technology. – 2020. – Т. 128. – С. 106257.
2. Ehrhardt M., Lorenz P., Bayer L., Han B., Zimmer K. Studies of the confinement at laser-induced backside dry etching using infrared nanosecond laser pulses // Applied Surface Science. – 2018. – Т. 427. – С. 686-692.
3. Shkuratova V., Rymkevich V., Kostyuk G., Sergeev M. Laser-induced microplasma as effective tool for phase elements fabrication on amorphous and crystalline materials // Journal of Laser Micro Nanoengineering. – 2018. – Т. 13, № 3. – С. 211-215.

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,
А.Ю. КОЗЛОВ, А.А. КОТКОВ, А.М САГИТОВА,
Д.В. СИНИЦЫН

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

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Разработаны широкополосные гибридные лазерные системы среднего ИК-диапазона на базе СО- и СО₂-лазеров с нелинейными кристаллами (ZnGeP₂, GaSe, AgGaSe₂, PbIn₆Te₁₀ и BaGa₂GeSe₆), излучающие сотни спектральных линий в спектральном диапазоне от 1.7 до 19.3 мкм.

A.A. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY, Yu.M. KLIMACHEV,
A.Yu. KOZLOV, A.A. KOTKOV, A.M. SAGITOVA, D.V.
SINITSYN

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

BROADBAND MID-INFRARED LASER SOURCES

Broadband mid-IR hybrid laser systems based on CO and CO₂ lasers and nonlinear crystals (ZnGeP₂, GaSe, AgGaSe₂, PbIn₆Te₁₀ and BaGa₂GeSe₆) were developed that emitted hundreds of spectral lines in the wavelength range from 1.7 to 19.3 μm.

Для решения ряда научных и прикладных задач, таких как газовый анализ, лазерная химия, медицина, большой интерес представляет разработка источников лазерного излучения среднего ИК-диапазона. В частности, источниками такого излучения являются широко известные СО- ($\lambda=4.8\div 7.7$ мкм [1]) и СО₂-лазеры ($\lambda=9.2\div 10.8$ мкм [2]). Генерация оптических гармоник данных лазеров в нелинейных кристаллах может позволить охватить ещё большую часть среднего ИК-диапазона, а также существенно обогатить спектр их излучения.

В первой части работы нами была создана лазерная система, одновременно работающая в двух спектральных диапазонах: основной полосе СО-лазера (4.9–6.0 мкм) и полосе его суммарных частот (2.5–3.0 мкм). Использовался импульсно-периодический многочастотный СО-лазера с ВЧ накачкой, работающего в режиме модуляции добротности резонатора. Преобразование частоты осуществлялось внутрирезонаторно в новом нелинейном кристалле BaGa₂GeSe₆ (BGGSe). Рассматривались различные конструкции резонатора лазера, причём в одной из них нелинейный кристалл использовался и как

выходное зеркало. Пиковая мощность лазерных импульсов основной и суммарной частот достигала 2 кВт и 10 Вт соответственно. Использование выходных зеркал с более высоким коэффициентом отражения для основной полосы излучения СО-лазера (~90% для ~4.9–5.9 мкм) привело к возрастанию мощности излучения генерации суммарных частот (ГСЧ), увеличению числа линий (до 170) и ширины спектра [3].

В дальнейшей работе удалось ещё больше расширить спектр лазерной системы в коротковолновую область за счёт генерации третьей гармоники – ГСЧ излучения основной полосы СО-лазера и суммарных частот, полученных в кристалле BGGSe внутрирезонаторно. Для этого использовался второй нелинейный кристалл BGGSe, расположенный вне резонатора СО-лазера. Спектр полученного излучения лежал в диапазоне длин волн 1.7–1.9 мкм, его мощность достигала 0.5 Вт [4].

Экспериментально исследован спектр ГСЧ излучения неселективного (многочастотного) СО-лазера, генерируемого в кристалле ZnGeP₂ в условиях некритичного фазового синхронизма, со спектральным разрешением 0.1 см⁻¹. Было обнаружено, что количество спектральных линий этого спектра примерно на порядок больше, чем у описанного ранее. Для молекул СО₂ экспериментально продемонстрирована возможность измерения профиля линии поглощения с помощью гребенки суммарных частот СО-лазера [5].

Излучение в длинноволновой области (~12–19.3 мкм) получено путём генерации разностных частот при смешении излучения импульсно-периодических СО- и СО₂-лазеров в нелинейных кристаллах AgGaSe₂, BGGSe или PbIn₆Te₁₀. Для указанных кристаллов была исследована эффективность преобразования частоты излучения в область ~12–19.3 мкм среднего ИК-диапазона, максимальное значение достигало 10⁻⁴ для нового кристалла PbIn₆Te₁₀ [6].

Таким образом, на базе СО- и СО₂-лазеров с нелинейными кристаллами была создана широкополосная гибридная лазерная система, излучающая в диапазоне длин волн от 1.7 до 19.3 мкм.

Работа проведена при поддержке РНФ (грант № 16-19-10619).

Список литературы

1. Puerta J., et al. // Applied physics. 1979. V.19 (4), P.439–440.
2. Wittman W. J. The CO₂ laser // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1987.
3. Ionin A.A., et al. // Optics Letters. 2018. V.43 (18), P.4358–4361.
4. Ionin A.A., et al. // Optics & Laser Technology. 2019. V.115, P.205–209.
5. A.A. Ionin, et al. // Infrar. Phys. Technol. 2019. V.100, P.62–66.
6. Ionin A.A., et al. // Optics Express. 2019. V.27 (17), P.24353–24361.

Т.А. СЕМЕНОВ^{1,2}, К.А. ИВАНОВ^{1,4}, И.Н. ЦЫМБАЛОВ¹, Р.В.
ВОЛКОВ¹, И.А. ЖВАНИЯ¹, М.С. ДЖИДЖОЕВ¹, А.В.
ЛАЗАРЕВ¹, А.Б. САВЕЛЬЕВ¹, В.М. ГОРДИЕНКО^{1,3}

¹*Физический и Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

²*ИПЛИТ РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника», Шатура*

³*ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва*

⁴*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ НАНОПЛАЗМЕ КРИПТОНА

Первые зарегистрирован широкополосный рентгеновский спектр излучения релятивистской лазерной наноплазмы Kr в диапазоне 5-200 кэВ. Струя наночастиц формировалась при сверхзвуковом расширении Kr из сверхкритического реактора. Рассмотрены особенности образования наноагрегатов в сверхзвуковой газовой струе при сверхкритических начальных условиях.

T.A. SEMENOV², K.A. IVANOV^{1,4}, I.N. TSYMBALOV¹,
R.V. VOLKOV¹, I.A. ZHVANIYA¹, M.S. DZHIDZHOEV¹,
A.V. LAZAREV¹, A.B. SAVEL'EV¹, V.M. GORDIENKO^{1,3}

¹*Physical and Chemical faculties of Lomonosov Moscow State University*

²*ILIT RAS – Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Shatura*

³*Federal Research Centre «Crystallography and Photonics», RAS, Moscow*

⁴*P.N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow*

BROADBAND GENERATION OF X-RAY RADIATION FROM RELATIVISTIC CRYPTON NANOPLASMA

For the first time the X-ray spectrum of relativistic laser nanoplasma Kr has been studied in a wide range of 5-200 keV. The nanoparticles jet was formed during the supersonic expansion of Kr from a supercritical reactor. The features of the formation of nanoaggregates in a supersonic gas jet under supercritical initial conditions are considered.

Рентгеновские время-разрешенные методы изучения вещества в настоящее время применяются для диагностики структурного состояния вещества и материалов. В качестве источника ультракоротких рентгеновских импульсов могут служить фемтосекундные лазерно-плазменные рентгеновские источники настольного типа. Существует широкий выбор мишеней для лазерного воздействия – металлические пластинки и ленты, потоки жидкости и

струи наночастиц. Последние сочетают такие преимущества, как отсутствие загрязняющих продуктов абляции и перманентное обновление, обеспечивающее работу с высокой частотой повторения и высоким уровнем поглощения в активной среде. Предметом данной работы является исследование возможности создания эффективного источника импульсов широкополосного (5-200кэВ) рентгеновского излучения на основе релятивистской наноплазмы Кг, продуцируемой с помощью фемтосекундной Ti:Sa лазерной системы субтераваттного класса мощности.

Наноагрегаты формировались методом сверхзвукового расширения газа высокого давления в вакуум через коническое сопло (угол раствора 10° , критическое сечение 0.5мм, выходной диаметр 4.7мм). Кг был выбран из-за его высокого зарядового номера Z с целью создания высокой плотности плазмы. Анализ состояния струи Кг при адиабатическом расширении на (p,T)-диаграмме (рис. 1) показывает, что изэнтропы при высоких начальных давлениях ($p_0 > 10$ атм, $T_0 = 298$ К) последовательно проходят газовую (зона 3), жидкую (зона 2) и твердую (зона 1) фазы, в результате этого возможно образование субмикронных агрегатов, таких как капель и кристаллов. Оценка на основе квазиодномерной модели расширения струи реального газа (газ Редлиха-Квонга) показывает, что минимально удаленная точка начала зоны конденсации соответствует сверхкритическим начальным условиям в реакторе ($p_0 = 60$ атм, $T_0 = 298$ К) и располагается на расстоянии менее 0.5мм от критического сечения конического сопла. Таким образом, на выходе из сопла будут наблюдаться наноагрегаты криптона (жидкой или твердой фазы) с размерами, существенно превышающими размеры кластеров, которые сформировались до начала зоны конденсации, что существенно для лазерно-плазменной генерации высокоэнергетических фотонов.

Воздействие на струи наноагрегатов Кг проводилось фемтосекундными (50фс) лазерными импульсами (0.8мкм, 45мДж) релятивистской интенсивности $\sim 3 \times 10^{18}$ Вт/см². Лазерный фокус находился в области максимальной плотности наночастиц на передней границе струи, что подтверждалось измерениями профиля рэлеевского рассеяния на ПЗС-матрице. Вследствие нелинейных свойств струи наночастиц, лазерное излучение испытывало релятивистскую самофокусировку, что подтверждалось измерениями пучков ускоренных электронов с энергиями более 500кэВ на сцинтилляторе LANEX. Регистрация рентгеновского спектра наноплазмы проводилась с помощью детекторов с прямой регистрацией рентгеновского излучения: кремниевая матрица с обратной засветкой (5-25кэВ) и

полупроводниковый детектор на чипе CdTe (20-200кэВ), с матрицами из кремния и теллурида кадмия. Сшивка данных двух детекторов позволила впервые осуществлять измерения рентгеновского спектра в диапазоне 5-200кэВ.

В результате проведенных исследований впервые зарегистрирован рентгеновский спектр свечения релятивистской наноплазмы Кг в широком диапазоне энергий 5-200кэВ (рис. 2), при этом измеренная эффективность конверсии лазерной энергии в рентгеновские кванты составила $\sim 2 \times 10^{-3}$. Измеренная эффективность генерации характеристической $K\alpha(12.6\text{кэВ})$ линии Кг составила $\sim 4.4 \times 10^{-7}$ с контрастом относительно тормозного излучения 10. Таким образом, продемонстрированы возможности источника жесткого рентгеновского излучения на основе релятивистской наноплазмы Кг с использованием импульсно-периодического (10 Гц) субтраваттного фемтосекундного Тi:Са лазера. Полученные результаты представляют также интерес и для изучения поведения биообъектов при экстремально высоких дозах их облучения.

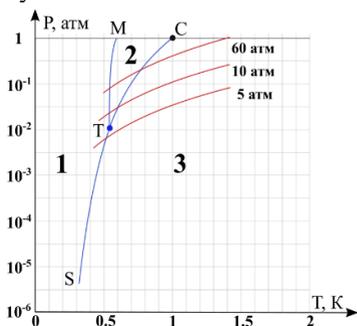


Рис. 1. (p,T)-диаграмма состояний Кг: ТС,ТМ,ТS – линии кипения, плавления, сублимации, С – критическая точка.

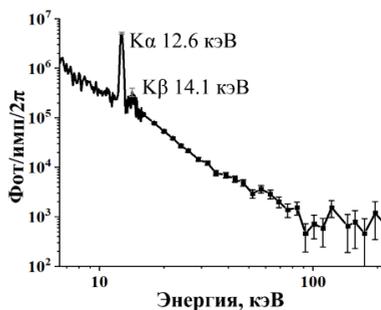


Рис. 2. Рентгеновский спектр релятивистской наноплазмы Кг.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта №20-21-00030 в части работ по лазерной генерации рентгеновского излучения, проекта РФФИ №18-29-06035 в части изучения формирования струй наноагрегатов из сверхкритических условий. Разработка методов формирования струй наночастиц проводилась в рамках Госзадания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН Министерства науки и высшего образования РФ. Рентгеновские спектры в диапазоне 5-25кэВ

измерены с помощью оборудования, приобретенного из средств гранта
РНФ 18-79-10160.

Т.А. СЕМЕНОВ^{1,2}, К.А. ИВАНОВ^{1,4}, И.Н. ЦЫМБАЛОВ¹, Р.В.
ВОЛКОВ¹,
И.А. ЖВАНИЯ¹, М.С. ДЖИДЖОЕВ¹, В.М. ГОРДИЕНКО^{1,3}, А.Б.
САВЕЛЬЕВ¹

1 - Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

2 - ИППЛИТ РАН - филиал ФНИЦ "Кристаллография и фотоника", Шатура

3 - ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва

4 - Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИШЕНЕЙ И НАНОАГРЕГАТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЛАЗЕРНОГО ПОЛЯ

Впервые проведены сравнительные исследования широкополосного рентгеновского излучения наноплазмы Кг с излучением плазмы твердотельных мишеней Мо, Та в диапазоне 5-200кэВ, получаемого в релятивистском режиме фемтосекундного Ti:Sa лазерного воздействия ($I \sim 3 \times 10^{18} \text{Вт/см}^2$).

T.A. SEMENOV^{1,2}, K.A. IVANOV^{1,4}, I.N. TSYMBALOV¹,
R.V. VOLKOV¹, I.A. ZHVANIYA¹, M.S. DZHIDZHIOEV¹,
A.B. SAVEL'EV¹, V.M. GORDIENKO^{1,3}

1 - Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University

*2 - ILIT RAS – Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS,
Shatura*

3 - Federal Research Centre «Crystallography and Photonics», RAS, Moscow

4 - P.N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow

X-RAY PLASMA RADIATION OF SOLID-STATE TARGETS AND NANOPARTICLES UNDER IRRADIATION BY RELATIVISTIC LASER FIELD

For the first time, comparative studies of broadband X-ray radiation from a Kr nanoplasma with the plasma radiation of solid-state Mo and Ta targets in the range of 5-200keV, obtained in the relativistic regime of femtosecond Ti:Sa laser irradiation ($I \sim 3 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$), have been carried out.

В настоящее время настольные лазерно-плазменные рентгеновские источники выступают в качестве бюджетной альтернативы синхротронным комплексам. Длительность рентгеновских импульсов, излучаемых такими источниками, сопоставима с длительностью воздействующих лазерных импульсов $\sim 10^{-13}$ с. Эффективность

генерации рентгеновского излучения во многом определяется выбором лазерных мишеней, в качестве которых часто выступают твердотельные среды. Струи субмикронных агрегатов, получаемые при конденсации газов, расширяющихся со сверхзвуковыми скоростями, могут использоваться в качестве дополнений твердотельным мишеням, сочетая практические преимущества газовой струи с высоким уровнем поглощения в среде. Предметом данной работы является сравнительное исследование генерации рентгеновского излучения в диапазоне ~ 5 -200кэВ наноплазмы Кг с излучением плазмы твердотельных мишеней Мо и Та, продуцируемого фемтосекундным лазерным излучением релятивистской интенсивности.

Наноагрегаты Кг формировались методом сверхзвукового расширения из сверхкритического состояния (60атм, 298К) в вакуум через коническое сопло (угол раствора 10° , критическое сечение 0.5мм, выходной диаметр 4.7мм). Твердотельные мишени представляли собой фольги Мо и Та, толщиной 100мкм. Воздействие на мишени проводилось фемтосекундными ($\Delta t=50$ фс) лазерными импульсами ($\lambda=0.8$ мкм, $E=45$ мДж) релятивистской интенсивности $I\sim 3\times 10^{18}$ Вт/см². В случае твердотельных мишеней, лазерный пучок падал на металлические пластинки под углом 45° . В случае струй наноагрегатов положение лазерного фокуса задавалось по максимальному выходу рентгеновского излучения, которое находилось на передней границе струи. Регистрация рентгеновского спектра проводилось с помощью детекторов с прямой регистрацией рентгеновского излучения: кремниевая матрица с обратной засветкой (5-25кэВ) и полупроводниковый детектор на чипе CdTe (20-200кэВ), с матрицами из кремния и теллурида кадмия. Сшивка данных двух детекторов позволила осуществлять измерения рентгеновского спектра в диапазоне 5-200 кэВ.

В результате проведенной работы выявлено, что выход тормозного рентгеновского излучения в твердотельных мишенях (Мо, Та) выше, чем в наноплазме Кг примерно 10-100 раз в диапазоне 5-200 кэВ (рис. 1 и 2). Близкие по атомным номерам Кг и Мо имели эффективности генерации характеристических К α линий 4×10^{-7} (12.6 кэВ) и 10^{-5} (17.3 кэВ), соответственно. Таким образом, впервые установлено преимущество твердотельных мишеней по эффективности генерации как характеристического, так и тормозного рентгеновского излучения в широком спектральном диапазоне по сравнению со струями наноагрегатов в режиме воздействия лазерного излучения релятивистской интенсивности. Созданные лазерно-плазменные источники могут быть использованы для широкого спектра задач:

рентгеновской время-разрешенной дифракции, получения изображений, рентгеновской спектроскопии поглощения, воздействия на биообъекты, а также фотовозбуждения низколежащих ядерных уровней, например, изомера Kr^{83} с энергией возбуждения 9.3 кэВ, совпадающей с $L\beta$ линией Ta, эффективность генерации которой была измерена нами экспериментально на уровне 5×10^{-6} .

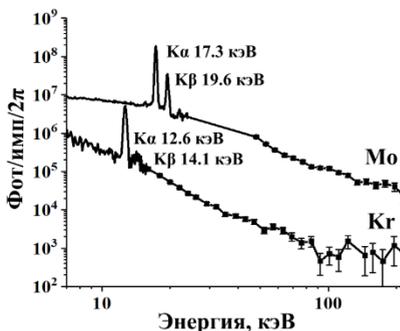


Рис. 1. Рентгеновские спектры плазмы наноагрегатов Kr и мишени Mo

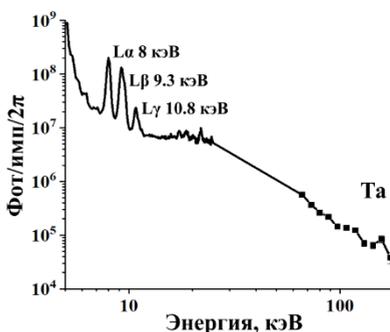


Рис. 2. Рентгеновский спектр плазмы мишени Ta

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта №20-21-00030 в части работ по лазерной генерации рентгеновского излучения, проекта РФФИ №18-29-06035 в части изучения формирования струй наноагрегатов из сверхкритических условий. Разработка методов формирования струй наночастиц проводилась в рамках Госзадания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН Министерства науки и высшего образования РФ. Рентгеновские спектры в диапазоне 5-25кэВ измерены с помощью оборудования, приобретенного из средств гранта РНФ 18-79-10160.

А.В. СКОБЛЯКОВ¹, А.В. КАНЦЫРЕВ¹, О. Н. РОЗМЕЙ^{2,3},
М.М. ГУРДЮМОВ³, М. М. ГЮНТЕР², П. ТАВАНА³, А.А. ГОЛУБЕВ¹

¹НИИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ, Москва

²GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr.1, Darmstadt,
Germany

³Goethe University, Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main,
Germany

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА GEANT4 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведено численное моделирование эксперимента по лазерной генерации нейтронов и гамма излучения на установке PHELIX (Дармштадт, Германия). Получено хорошее согласие между экспериментально измеренными и смоделированными выходами изотопов. Определена оптимизированная схема будущего эксперимента с помощью которой можно достичь 300 кратное увеличение выходов изотопов и 140 кратное увеличение потока нейтронов.

**A. SKOBLIAKOV¹, A. KANTSYREV¹, O. N. ROSMEJ^{2,3},
M. GYRDYMOV³, M. M. GÜNTHER², P. TAVANA³, N.
ANDREEV⁴,
A. GOLUBEV¹**

¹Institute for Theoretical and Experimental Physics named by A.I. Alikhanov of NRC
"Kurchatov Institute", Moscow

²GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr.1, Darmstadt,
Germany

³Goethe University, Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main,
Germany

⁴Joint Institute for High Temperatures, RAS, Izhorskaya st.13, Bldg. 2, 125412
Moscow

APPLICATION OF GEANT4 TOOLKIT FOR MODELING OF EXPERIMENTS ON LASER-DRIVEN NEUTRON AND GAMMA GENERATION

Numerical simulation of an experiment on laser generation of neutrons and gamma radiation at the PHELIX facility (Darmstadt, Germany) has been carried out. Good agreement was obtained between the experimentally measured and simulated isotope yields. An optimized scheme of the future experiment has been determined,

which can be used to reach by 300 factor of higher photonuclear reaction yield and by 140 factor of higher neutron flux.

Нейтронные и гамма источники с высокой интенсивностью играют важную роль во многих областях исследований, таких как физика высокой плотности энергии, материаловедение и ядерная астрофизика [1]. Хорошо направленные, сильноточные, релятивистские электронные пучки являются идеальными кандидатами для образования (γ , xn) реакций путем проникновения в материалы с высоким Z . Это основная концепция программы ядерной физики на лазере в ELI-NP [2]. Пороги таких реакций лежат в МэВ энергетическом диапазоне, так что для получения интенсивного рентгеновского излучения, необходимо большое количество релятивистских электронов. В экспериментах на лазерной установке PHELIX (Германия, г. Дармштадт) сильноточные хорошо направленные пучки электронов с энергией МэВ генерировались при взаимодействии пикосекундного лазерного импульса с плотностью потока излучения $1-2 \times 10^{19}$ Вт/см² с плазмой, длина которой $\sim 10^2$ мкм с плотностью электронов, близкой к критической. Такая плазма создавалась с помощью механизма сверхзвуковой ионизации, в котором хорошо контролируемый наносекундный лазерный предимпульс посылался на полимерные аэрогели низкой плотности до прихода основного лазерного импульса [3]. В результате, в направлении распространения лазерного импульса регистрировались пучки суперпандеромоторных электронов с эффективными температурами выше 10 МэВ и максимумом измеряемой энергии до 90 МэВ. Взаимодействие электронов с материалами с высоким Z вызывает образование МэВ-гамма-излучения и фотоядерные реакции. В эксперименте был измерен высокий выход изотопов Ta, Cr и Au, а также выход нейтронов из пробы In.

Эксперимент моделировался с помощью кода Geant4, который включает в себя физические процессы и базы данных о взаимодействиях частиц с веществом [4, 5]. Моделирование было выполнено для тестирования модели с использованием экспериментальных данных. В эксперименте, и при моделировании электронный пучок проходит через Au-конвертор толщиной 1 мм, создавая тормозное излучение. Гамма и электроны, вылетевшие из конвертора, взаимодействовали с набором материалов с высоким Z , размещенных под углом 5° к направлению распространения лазера на расстоянии 18 см от точки взаимодействия лазера с аэрогелем-пенной (Рисунок 1).

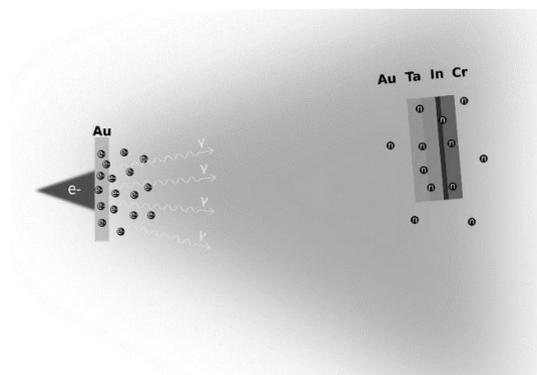


Рис. 1. Схема модели для исследования (γ, xn) фотоядерных реакций.

Для моделирования фотоядерных реакций использовался физический пакет ShieldingLEND (Low Energy Nuclear Data) [5]. Этот физический пакет обеспечивает высокую точность данных сечения фотоядерных реакций ниже 20 МэВ, что показывает хорошее согласие с экспериментальными данными. Для энергий выше 20 МэВ использовался один из стандартных физических пакетов. Хорошее согласие между экспериментально измеренными и смоделированными выходами изотопов позволяет оптимизировать экспериментальную установку для достижения рекордных значений нейтронных потоков (Рис. 2).

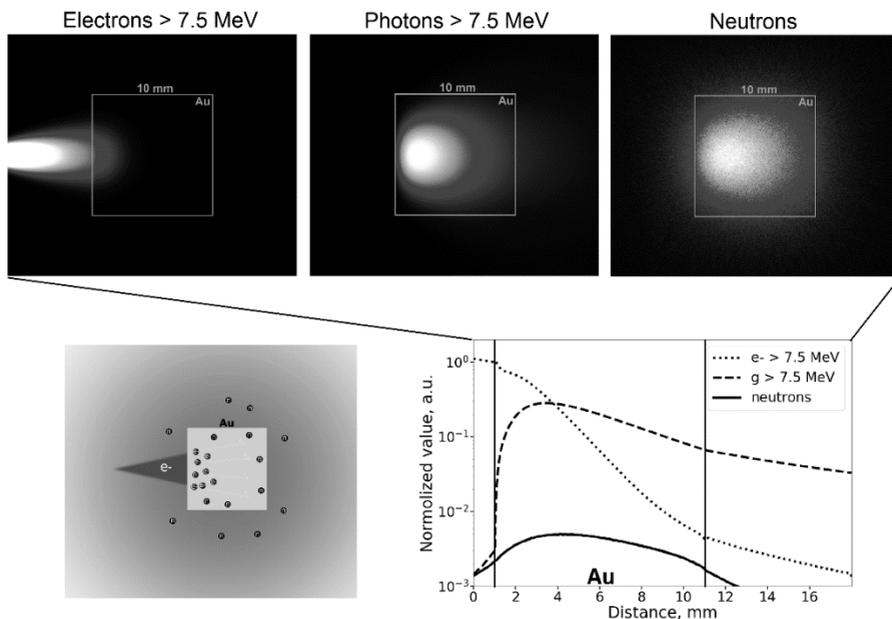


Рис. 2. Оптимизированная схема по измерению выходов фотоядерных реакций и потока нейтронов

В результате, используя данную оптимизированную схему при аналогичных параметрах луча лазера, можно достичь 300 кратное увеличение выходов изотопов и 140 кратное увеличение потока нейтронов [1].

Список литературы

1. Pomerantz I et al, Phys. Rev. Lett. **113** (2014)184801
2. Negoita F et al, Romanian Reports in Physics, **68**, Supplement, P., 37–144 (2016).
3. Rosmej O N et al, New J. Phys. **21** (2019) 043044
4. Geant4 Toolkit http://geant4_userdoc.web.cern.ch_userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf
5. <https://indico.cern.ch/event/781244/contributions/3251933/attachments/1782461/2902499/HadronicPhysics.pdf>

А.И. САВЕЛЬЕВА, В.В. ФИЛАТОВ

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

**РАСЧЕТ ЭФФЕКТА СУПЕРЛИНЗИРОВАНИЯ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЛОБУЛЯРНОМ
ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ НА ОСНОВЕ
ИСКУССТВЕННОГО ОПАЛА**

Рассчитан эффект суперлинзирования лазерного излучения на краях стоп-зоны глобулярного фотонного кристалла. Предлагается использование опалоподобного фотонного кристалла в качестве фотокатализатора холодного (лазерного) синтеза.

A.I. SAVELIEVA, V.V. FILATOV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**LASER SUPERLENSING IN THE OPAL-BASED GLOBULAR
PHOTONIC CRYSTAL**

The paper deals with the laser superlensing at the photonic bandgap edges in the opal-like globular photonic crystal. The results are important for the cold (laser) fusion.

Глобулярный фотонный кристалл – композиционный материал с периодической свехструктурой, представляющий собой правильную гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку, сформированную искусственным путем из глобул (шаров) одного диаметра посредством осаждения твердых коллоидных частиц из химического раствора. Как показывают расчеты [1], в глобулярном фотонном кристалле на основе искусственного опала следует ожидать эффекта суперлинзирования внешнего оптического излучения на частоте, соответствующей запрещенной фотонной зоне (стоп-зоне) композита. В связи с изложенным целью настоящей работы является дальнейший теоретический анализ эффекта как открывающего возможность использования глобулярного фотонного кристалла в качестве фотокатализатора для задачи холодного (лазерного) ядерного синтеза.

В работе [2] было показано, что оптические свойства одномерного фотонного кристалла могут быть успешно описаны с помощью осцилляторной модели, поэтому в данной работе мы ограничимся анализом свойств композита только в одном, наиболее предпочтительном, кристаллографическом направлении [111], вдоль

которого происходит синтез образца. В этом случае диэлектрическая функция материала имеет вид

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} \prod_j \frac{\omega_{lj}^2 - \omega^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2}, \quad (1)$$

где ω_j и ω_{0j} – характерные частоты композита. При этом показатель преломления фотонного кристалла равен

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)\mu} = \sqrt{\varepsilon_{\infty} \prod_j \frac{\omega_{lj}^2 - \omega^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \mu}, \quad (2)$$

а закон дисперсии электромагнитных волн в материале приобретает вид

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c} n(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{\infty} \prod_j \frac{\omega_{lj}^2 - \omega^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \mu}. \quad (3)$$

Таким образом, групповая скорость света в фотонном кристалле есть

$$v(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = \left[\frac{dk(\omega)}{d\omega} \right]^{-1} = \left[\frac{d}{d\omega} \left\{ \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{\infty} \prod_j \frac{\omega_{lj}^2 - \omega^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \mu} \right\} \right]^{-1}. \quad (4a)$$

Ограничившись для простоты только одним осциллятором (что является хорошим приближением для интересующей нас спектральной области в непосредственной близости стоп-зоны), получим

$$v(\omega) = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{\infty}\mu}} \cdot \frac{(\omega_l^2 - \omega^2)^{\frac{1}{2}} (\omega_0^2 - \omega^2)^{\frac{3}{2}}}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega_0^2 (\omega_l^2 - \omega_0^2)}. \quad (4б)$$

Как видно из (4б), в глобулярном фотонном кристалле происходит полная «остановка» света на частотах $\omega = \omega_l$ и $\omega = \omega_0$, что свидетельствует о нахождении условий поляритонной бозе-конденсации. При этом вся световая энергия соответствующих частот, поступающая извне, «запирается» в тонком (порядка длины волны) приповерхностном слое композита, то есть, в первой приповерхностной поре (микроролости) фотонного кристалла.

Таким образом, в указанной микрополости формируется стоячая световая волна, амплитуда которой увеличивается пропорционально времени экспозиции в соответствии с законом сохранения энергии:

$$\frac{dW_{cavity}}{dt} = P_{laser} \Rightarrow W = Pt \Rightarrow \frac{\epsilon_0 E^2}{2} Sl = Pt \Rightarrow E = \left(\frac{2Pt}{\epsilon_0 Sl} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где P – мощность излучения непрерывного лазера, освещающего фотонный кристалл на частоте $\omega = \omega_l$ или $\omega = \omega_0$, S – сечение лазерного пучка, $l \approx \lambda$ – размер микрополости, t – время экспозиции.

Результаты расчета по формуле (5) показывают, что, например, использование непрерывного лазера мощностью порядка 1 Вт/мм², линия генерации которого соответствует краю стоп-зоны фотонного кристалла, позволяет за 1 сек экспозиции получить в центре первой приповерхностной микрополости поле

$$E \approx \left(\frac{2 \cdot 1 \cdot 1}{10^{-11} \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^{11} \text{ (В/м)}, \quad (5)$$

что на 8 порядков превышает исходное поле лазерного источника.

Таким образом, в глобулярном фотонном кристалле следует ожидать существенного эффекта суперлинзирования лазерного излучения (при условии поддержания резонансной добротности путем надлежащего криостатирования), что открывает возможности использования опалоподобных композитов для задачи холодного лазерного синтеза по технологии [3]. Так, подбор размера глобул фотонного кристалла таким образом, чтобы суперлинзирование происходило на собственной частоте колебания молекулы D₂O, позволит использовать эффект для отщепления иона дейтерия от молекулы, тем самым катализируя синтез.

Список литературы

1. С.В. Пичкуненко, В.В. Филатов. Локализация и усиление электромагнитного поля в микрополостях глобулярного фотонного кристалла // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т.9, №6. С. 582-584.

2. S.V.Pichkurenko. Dispersion of Light in the 1D Photonic Crystal// IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 859. Art.012003.

3. Патент на полезную модель №RU 195095 U1 «Проточная ячейка для проведения химических реакций», 18.10.2019.

**И.В. ФИРСОВ, Д.А. КОЧУЕВ, А.Н. ЗОЛОТОВ, А.Ф. ГАЛКИН,
А.С. ЧЕРНИКОВ**

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ЭРОЗИОННОГО ФАКЕЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Исследован характер отклонения лазерного эрозионного факела и аблированных частиц облучаемой мишени в лилии электростатическом поле с напряженностью $1.5 \cdot 10^6$ В/м. Получены микрофотографии продольного профиля лазерного эрозионного факела в зависимости от положения отклоняющих высоковольтных электродов. Получены данные о влиянии положения электродов на отклонение траекторий разлета аблированных частиц облучаемого материала в соответствии профилю силовых линий электростатического поля.

I.V. FIRSOV, D.A. A. N. KOCHUEV ZOLOTOV, A.F. GALKIN,
A.S. CHERNIKOV.

Vladimir State University, Vladimir, Russia

RESEARCH OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF LASER EROSION TORCH IN LASER ABLATION

The character of the deflection of the laser erosion plume and ablated particles of the irradiated target as a result of laser ablation in the presence of an electrostatic field with a strength of $1.5 \cdot 10^6$ V/m is investigated. Micrographs of the longitudinal profile of the laser erosion plume were obtained depending on the position of the tilting high-voltage electrodes. Data are obtained on the influence of the position of the electrodes on the deviation of the scattering trajectories of ablated particles of the irradiated material in accordance with the profile of the lines of force of the electrostatic field.

Исследование взаимодействия лазерного эрозионного факела с электрическим полем является актуальной задачей. Данные исследования открывают решение проблемы очистки области распространения лазерного излучения от взвешенных частиц (образующихся при лазерной обработке, сварке, скрайбировании) обрабатываемого материала, которые препятствует распространению лазерного луча [1, 2]. Вследствие этого достигается более эффективное воздействие лазерного излучения на поверхность обрабатываемого материала. Повышение эффективности достигается за счет снижения экранирования лазерного излучения поверхностью лазерно-индуцированного плазменного факела [3].

Целью данного исследования является оценка влияния электростатического поля с напряженностью 15^6 В/м на характер отклонения лазерного эрозионного факела и концентрацию аблированных частиц в области распространения лазерного луча при

различных параметрах абляционного воздействия в атмосферных условиях.

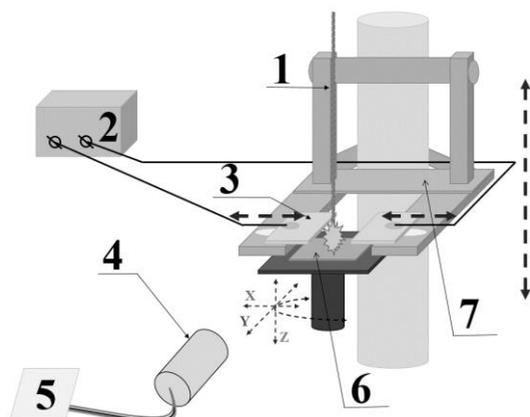


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента: 1) лазерное излучение 2) источник высокого напряжения порядка 3-30 кВ, 3) отклоняющие электроды, 4) CCD-камера, 5) персональный компьютер, 6) облучаемая мишень, 7) сканирующий держатель электродов

В процессе лазерной абляционной обработки поверхности образца Al_2O_3 осуществлено сканирование лазерного эрозионного факела высоковольтными электродами вдоль оси его распространения, одновременно регистрировалось отклонение профиля лазерного эрозионного факела в продольном сечении. Сканирование профиля факела осуществлялось с помощью прецизионного трех-координатного стола. Регистрация профиля лазерного эрозионного факела осуществлялась с помощью CCD-камеры. Источник высокого напряжения создавал стабильный потенциал на обоих электродах порядка 30 кВ [4]. Электрический пробой между контактом источника напряжения и мишенью наблюдался при длительной экспозиции в результате значительного осаждения аблированных частиц на поверхности электродов, как следствие уменьшения разрядного промежутка.

Список литературы

1. Byeon J. H. et al. Collection of submicron particles by an electrostatic precipitator using a dielectric barrier discharge //Journal of aerosol science. – 2006. – V. 37. – №. 11. – P. 1618-1628.
2. Grigoriu C. et al. Capture of particles from an iron and steel smelter with a pulse-energized electrostatic precipitator //Aerosol and Air Quality Research. – 2012. – V. 12. – №. 5. – P. 673-682.
3. K.V. Kozadaev// "Quantum Electronics" 2014, Vol. 44, No. 4, P. 325-329.

4. S.V. Vasiliev, A.Yu. Ivanov// "Quantum Electronics" 2012, Vol. 42, No. 2, P. 170-174.

А.А. ФРОЛОВ

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

ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ S-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМОЙ

Построена теория генерации терагерцового (ТГц) излучения при падении *s*-поляризованного лазерного импульса на полуограниченную плазму, плотность которой значительно меньше критического значения. Исследованы угловые, спектральные и энергетические характеристики ТГц импульса в зависимости от угла падения и длительности лазерного излучения. Показано, что энергия ТГц сигнала максимальна при падении лазерного импульса под скользящим углом, когда имеет место эффект полного отражения лазерного излучения от границы плазмы.

A.A. FROLOV

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

TERAHERTZ RADIATION AT THE INTERACTION OF S- POLARIZED LASER PULSE WITH RAREFIED PLASMA

The terahertz wave packet emission theory is constructed when an *s*-polarized laser pulse is incident on a semi-infinite plasma whose density is much lower than the critical value. The angular, spectral and energy characteristics of a terahertz pulse are studied as the function of the plasma density, the angle of incidence and the duration of laser radiation. It is shown that the energy of the terahertz signal has the maximum value at the fall of the laser pulse at grazing angles, when the effect of total reflection of the laser radiation from the plasma boundary takes place.

Рассмотрена задача о наклонном падении *s*-поляризованного лазерного импульса на границу разреженной плазмы, занимающей полупространство [1]. Показано, что даже при плотностях плазмы значительно меньше критического значения возможно полное отражение лазерного излучения при скользящем падении. Установлено, что при падении под углом полного отражения электрическое поле лазерного излучения в плазме имеет максимальное значение, а перенос энергии в этом случае происходит только вдоль границы. На основе уравнений Максвелла, усредненных по высокочастотным колебаниям, и уравнения движения для электронов плазмы с учетом пондеромоторного воздействия лазерного излучения рассмотрено возбуждение терагерцовых (ТГц) полей в плазме и в вакууме. Изучены физические характеристики ТГц излучения в вакууме и показано, что

оно распространяется в направлении лазерного импульса, отраженного от границы плазмы. Исследован спектр ТГц излучения и показано, что он существенно зависит от угла падения, плотности электронов плазмы и длительности лазерного излучения. При малых углах падения в спектре излучения присутствует спектральная линия вблизи плазменной частоты, если длительность лазерного импульса τ сравнима с обратной плазменной частотой. При увеличении угла падения линия на плазменной частоте постепенно исчезает и когда τ заметно превышает период плазменных колебаний, то появляется широкий максимум на частоте сопоставимой с $1/\tau$ - обратной длительностью лазерного импульса. Установлено, что высота этого спектрального максимума имеет наибольшую величину, когда имеет место эффект полного отражения лазерного излучения. Интегрированием по спектру вычислена полная энергия ТГц излучения и показано, что она имеет максимальное значение при падении лазерного импульса на плазму под углом полного отражения (рис. 1).

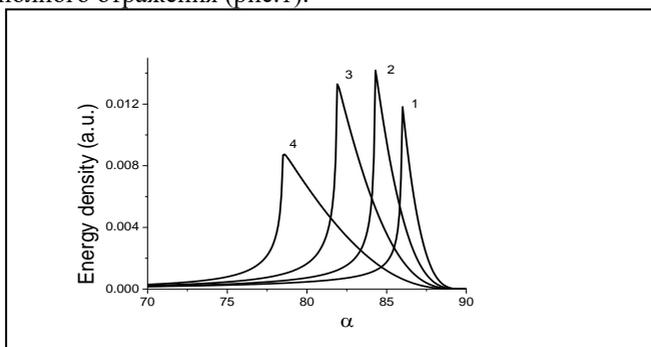


Рис. 1. Зависимость энергии ТГц излучения от угла падения лазерного импульса α . Кривым 1 - 4 соответствуют нормированные на критическое значение плотности электронов 0.005, 0.01, 0.02, 0.04.

Обсуждаются условия применимости представленной теории и приводятся оценки для характеристик ТГц излучения применительно к условиям современных лазерно-плазменных экспериментов. Полученные оценки свидетельствуют о возможности получения высокоинтенсивных ТГц импульсов под действием лазерного излучения при скользких углах падения, когда имеет место эффект полного отражения.

Список литературы

1. Frolov A. A., *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2020, V. 62, P. 0950020.

Л.Ф. ХАЕРТДИНОВА, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Э.Р. ТОЛОРДАВА,
С.И. КУДРЯШОВ, А.А. ИОНИН

*Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук ФИАН,
Москва, Россия, Национальный исследовательский центр эпидемиологии и
микробиологии имени Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия*

АПЛИКАЦИОННЫЙ ЛАЗЕРНО-ГЕНЕРИРОВАННЫЙ ПЕРЕНОС ДЛЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрен метод аппликационного лазерно-генерированного переноса наночастиц для антибактериального применения. Были проведены исследования влияния толщины пленок и параметров излучения лазера, на основании чего был выявлен наиболее эффективный режим.

L.F. KHAERTDINOVA, A.A. NASTULYAVICHUS,
E. R. TOLORDAVA, S.I. KUDRYASHOV, A.A. IONIN
*P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia, N.F. Gamaleya Federal Research Centre of Epidemiology and
Microbiology, Moscow, Russia*

LASER-INDUCED FORWARD TRANSFER (LIFT) FOR ANTIBACTERIAL APPLICATION

A method of laser-induced forward transfer of nanoparticles for antibacterial use is considered. Variable laser beam energy and thickness of metal coat study was carried out and the optimal regime is revealed.

Одной из важнейших проблем медицины можно назвать все увеличивающуюся устойчивость бактерий к широко используемым антибиотикам. Это объясняется не только формирующейся устойчивостью к конкретным видам лекарств, но и способностью бактерий формировать биопленки. Структура биопленок позволяет бактериям выживать в присутствии антибиотиков в количествах в 500-1000 раз больших, нежели в планктонном состоянии.

В настоящий момент изучаются несколько альтернативных методов борьбы с биопленками. Предлагаемый метод – аппликационный лазерно-генерированный перенос (LIFT) – предполагает инактивацию бактерий с помощью наночастиц серебра и меди. Облучение лазером тонкой пластиковой подложки с нанесенным поглощающим металлическим слоем вызывает генерацию наночастиц за счет взаимодействия излучения с веществом. Полученные наночастицы

попадают непосредственно на стеклянную подложку с выращенной биопленкой. Такой способ прост и эффективен.

Целью работы является изучение предложенного метода и выявление зависимости бактерицидного действия от толщины металлической пленки, а также от параметров лазерного излучения. Также была проделана работа по анализу получаемых наночастиц методами СЭМ, динамического рассеяния и спектрофотометрии.

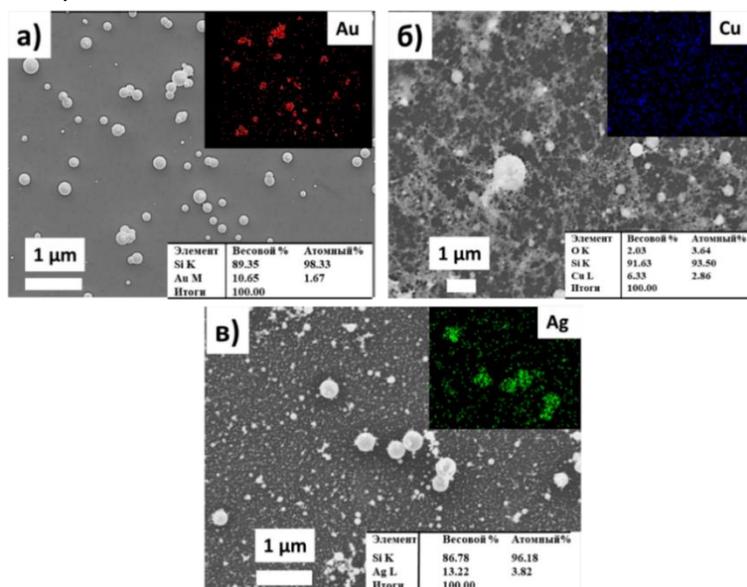


Рис 1. СЭМ визуализация покрытия из перенесенных наночастиц с полимерной подложки на кремнии (а)- золото, (б)-медь, (в)-серебро; вставки: результаты ЭДПС, распределение Au, Cu, Ag в выделенной области

В данной работе использовался наносекундный волоконный лазер HTF MARK (Булат) на ионах Yb^{3+} с длительностью импульса на полувысоте 120 нс, максимальной энергией в импульсе 1мДж и частотой повторения импульсов до 80 кГц. Для исследования влияния наночастиц на бактерии использовались микробиологические и современные микроскопические методы исследования бактериальных биопленок.

Список литературы

1. A. Nastulyavichus et al, *Nanomaterials*, 2020, 10(11), 2259

А.А. ШЕРНИЁЗОВ, Ш.Д. ПАЙЗИЕВ, Х.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ,
А.Г. КАХХОРОВ, Ш.А. БЕГИМКУЛОВ, А.Г. АЛИБОЕВ,
Ф. КАМОЛИДДИНОВ, Ф.А. ШЕРМАТОВА

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, ул. Дурмон йули 33,
100125, Ташкент, Узбекистан*

ЭФФЕКТИВНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЛАЗЕР НА Ce:Nd:YAG С БОКОВОЙ НАКАЧКОЙ В МНОГОПРОХОДНОЙ СХЕМЕ

Аннотация. Была разработана симуляционная модель недавно реализованного солнечного лазера Ce:Nd:YAG с боковой накачкой с использованием трассировки фотонов методом Монте-Карло. На основе симуляционной модели были изучены возможные методы повышения эффективности преобразования мощности в мощность солнечного лазера Ce:Nd:YAG. Продемонстрирована эффективность многопроходной схемы накачки для солнечных лазеров Ce:Nd:YAG. Кроме того, был исследован потенциал стержня Cr:LiCAF в качестве преобразователя цвета для солнечных лазеров Ce:Nd:YAG. Показано, солнечный лазер Ce:Nd:YAG может достигать 5,3% эффективности преобразования мощности, при этом улучшая недавно полученную эффективность 2,6%.

A.A. SHERNIYOZOV, SH.D. PAYZIYEV, KH.F.
ZIKRILLAYEV, A.G. QAHHOROV, SH.A. BEGIMKULOV,
A.G. ALIBOYEV, F.M. KAMOLIDDINOV, F. A. SHERMATOVA

*Institute of Ion-plasma and laser technologies, Durmon yuli Street 33, 100125,
Tashkent, Uzbekistan*

SIDE-PUMPED EFFICIENT CE:Nd:YAG SOLAR LASER IN MULTI-PASS SCHEME

Abstract. A simulation model for a recently realized side-pumped Ce:Nd:YAG solar laser is developed using Monte-Carlo photon tracing method. Based on the simulation model, we studied possible techniques for increasing power-to-power conversion efficiency of Ce:Nd:YAG solar laser. Effectiveness of multi-pass pumping scheme for Ce:Nd:YAG solar lasers is demonstrated. In addition, we studied the potential of Cr:LiCAF rod as a color converter for Ce:Nd:YAG solar lasers. It is shown that Ce:Nd:YAG solar laser can achieve 5.3 % power-to-power conversion efficiency improving recently obtained 2.6% efficiency.

The main obstacle on the path forward in the field of solar lasers is low power-to-power conversion efficiency. Recent advances in solar lasers [1, 2] showed that doubly doped laser mediums such as Cr:Nd:YAG or Ce:Nd:YAG can significantly improve power-to-power conversion

efficiency. Therefore, here we studied Ce:Nd:YAG solar lasers with the aim of further increase in conversion efficiency by applying two methods: multi-pass pumping scheme and using a color converter. For adequate assessment of multi-pass pumping scheme efficiency, we initially modeled a simple pumping scheme used in the latest experimental study [2] on Ce:Nd:YAG, where secondary concentrator consists of the fused silica semispherical lens and 2D trapezoidal-shaped cavity. After validating the simulation model, we studied possible techniques for increasing power-to-power conversion efficiency of Ce:Nd:YAG solar lasers. Using parameters given in the study, we modeled Ce:Nd:YAG solar laser on multi-pass scheme. (Fig. 1). The retro-reflector is used to redirect photons toward the lasing medium. In the Fig. 1a trajectories of four sampled solar photons are presented. The multi-pass pumping cavity significantly increases

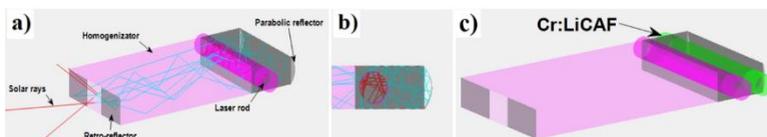
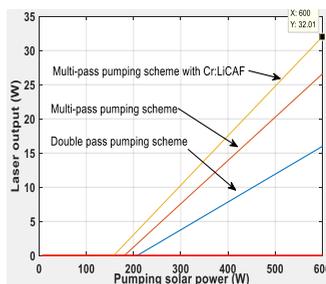


Fig. 1. General view of secondary concentrator

absorption probability of photons. Then we introduced a Cr:LiCAF rod in close proximity to the laser medium, as in Fig. 1c. Size of the converter was the same as the lasing medium: 5 mm diameter and 40 mm length. Under the similar conditions used in [2], using a simulation model, an absorption efficiency of 16.5% was determined achieving 32 W laser output doubling the experimentally obtained result with double pass pumping cavity. Graphic shows that applying multi-pass pumping scheme can increase the power-to-power conversion efficiency from experimentally obtained 2.3% [2] to 4.4%. In addition, the use of Cr:LiCAF rod as color converter can further increase the efficiency up to 5.3%.



References

1. Payziyev, Sh, Kh Makhmudov, and Yasser A. Abdel-Hadi. "Simulation of a new solar Ce: Nd: YAG laser system." *Optik* 156 (2018): 891-895.
2. Vistas, Cláudia R., Dawei Liang, Joana Almeida, Bruno D. Tibúrcio, Dário Garcia, Miguel Catela, Hugo Costa, and Emmanuel Guillot. "Ce: Nd: YAG side-pumped solar laser." *Journal of Photonics for Energy* 11, no. 1 (2021): 018001

В.А. ШКУРАТОВА, Г.К. КОСТЮК, А.А. ПЕТРОВ,
А.А. САМОХВАЛОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ФАЗОВЫЕ МАСКИ ИЗ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН ДЛЯ ОЧЕРТАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ПЛОСКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В настоящей работе приведено теоретическое и экспериментальное обоснование метода преобразования распределения интенсивности Гауссовых линейно поляризованных пучков к очертаниям различной конфигурации в плоскости изображения. Предложенный метод основан на применении фазовых масок, изготовленных на пластинах из двулучепреломляющего кристалла.

V.A. SHKURATOVA, G.K. KOSTUYK, A.A. PETROV,
A.A. SAMOKHVALOV

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

PHASE MASKS FROM BIREFRINGENT CRYSTAL PLATES FOR LASER BEAM SHAPING IN THE IMAGE PLANE

In this work, a theoretical and experimental background of a method for shaping intensity distribution of Gaussian linearly polarized beams to various configurations in the image plane is presented. The proposed method is based on using phase masks made on plates from a birefringent crystal.

На сегодняшний день методы очертания лазерных пучков принято разделять на две основные группы: формирование очертаний в (i) фокальной плоскости [1] или (ii) плоскости изображения [2], совещенных с плоскостью лазерной обработки. В последние годы все большее внимание уделяется исследованиям, направленным на применение методов второй группы. Методы обеих групп в основном реализуются с применением пространственных модуляторов света, во избежание оптического пробоя которых накладываются ограничения на значения энергии и длительности импульсов лазерного излучения.

Мы предлагаем более простой в реализации метод очертания лазерных пучков, который относится к методам второй группы и базируется на применении фазовых масок (ФМ), изготовленных на двулучепреомляющих пластинах с главной кристаллической осью, параллельной поверхности пластин (Y-срез). ФМ должны содержать вытравленные области, соответствующие по форме желаемому очертанию лазерного пучка. Глубина травления h этих областей должна

обеспечивать фазовый сдвиг π в проходящем через них линейно поляризованном излучении и поворот вектора линейной поляризации на 90° . При установке ФМ между линейным поляризатором (Π) с азимутом пропускания, ориентированным под углом 45° к направлению главной кристаллической оси двулучепреломляющей пластины, и анализатором (A), азимут пропускания которого может быть ориентирован как перпендикулярно, так и параллельно азимуту пропускания Π , в зависимости от толщины h_0 исходной пластины, форма вытравленных областей преобразуется в распределение интенсивности на выходе A . Далее полученное распределение проецируется с применением линзы или объектива в плоскость изображения.

Мы изготовили и исследовали ФМ трех оптических конфигураций (рис. 1). Для изготовления ФМ была применена технология структурирования оптически прозрачных диэлектриков лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП) [3]. В качестве заготовок для ФМ были использованы пластины CaCO_3 . Изготовленные ФМ были протестированы в схеме с волоконным лазером, излучающим на длине волны $\lambda = 1.064$ мкм. С их применением были получены пучки желаемой геометрии (рис. 1).

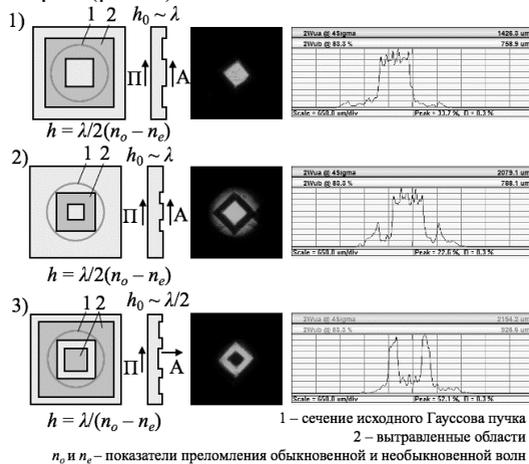


Рис. 1. Оптические конфигурации ФМ и результаты их тестирования
Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-71-10103).

Список литературы

1. Sanner N. et al. // Opt. Lett. 2005. Vol. 30, P. 1479–1481.
2. Allegre O.J. et al. // Opt. Express. 2013. Vol. 21, P. 21198–21207.
3. Shkuratova V.A. et al. // Opt. Mat. Express. 2020. Vol. 9, P. 2392–2399.

А.Г. ШУБНЫЙ¹, Е.О. ЕПИФАНОВ¹, Н.В. МИНАЕВ¹, В. И.
ЮСУПОВ¹, А.О. РЫБАЛТОВСКИЙ^{1,2}

¹ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия

МЕТОД ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ AU/AG

Рассмотрен метод лазерной абляции составной золото-серебряной мишени в среде сверхкритического диоксида углерода для синтеза биметаллических золото-серебряных наночастиц различного типа. Предложена простая модель объясняющая полученные результаты.

A.G. SHUBNYY¹, E.O. EPIFANOV¹, N.V. MINAEV¹, V. I.
YUSUPOV¹, A. O. RYBALTOVSKIY^{1,2}

¹FSRC «Crystallography and photonics» RAS, Moscow, Russia

²Research Institute of Nuclear Physics MSU, Moscow, Russia

METHOD OF LASER ABLATION IN A MEDIUM OF SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE TO OBTAIN BIMETALLIC AU / AG NANOPARTICLES

A method of laser ablation of a composite gold-silver target in a supercritical carbon dioxide medium for the synthesis of bimetallic gold-silver nanoparticles of various types is considered. A simple model is proposed to explain the results obtained.

Представлен подход к реализации синтеза биметаллических наночастиц Au/Ag методом импульсной лазерной абляции мишени, состоящей из двух пластин золота и серебра, в среде сверхкритического диоксида углерода. Показано, что данные частицы могут обладать рядом полезных плазмонных и каталитических свойств [1-2]. Предложенный к синтезу таких частиц подход относится к области «зеленой химии», при его реализации было использовано две геометрических конфигурации расположения мишени и два различных источника лазерного излучения. В первой конфигурации мишень была расположена вертикально на боковой стенке реактора высокого давления и абляция ее компонентов происходит поочередно неподвижным горизонтальным пучком с низкой частотой следования лазерных импульсов (50 Гц). Во второй конфигурации мишень была

расположена горизонтально на дне реактора, а абляция ее частей происходила поочередно посредством сканирования вертикального пучка с высокой частотой следования лазерных импульсов (60 кГц). Была продемонстрирована принципиальная возможность получения биметаллических наночастиц различного типа в зависимости от конфигурации: при использовании конфигурации «1» получались наночастицы Au/Ag преимущественно типа «alloy», при использовании конфигурации «2» - типа «core-shell» с золотым ядром и серебряной оболочкой. Была предложена простая модель, объясняющая полученные результаты (Рис.1).

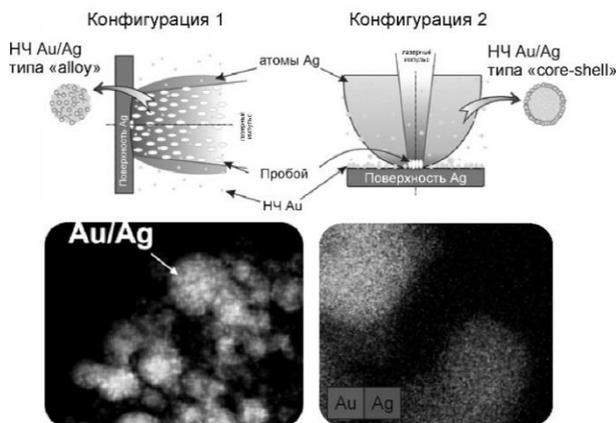


Рис. 1. Иллюстрация модели образования наночастиц Ag/Au типа «alloy» и типа «core-shell» и ПЭМ изображения синтезированных частиц данных типов
Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-29-06056.

Список литературы

1. Jellinek J. Nanoalloys: Tuning properties and characteristics through size and composition // Faraday Discuss. 2008. Vol. 138. P. 11–35.
2. Eng N.B. Article Nano Biomed Eng Synergetic Antibacterial Effects of Silver Nanoparticles @ Aloe Vera Prepared via a Green Method. P. 267–274.

В.М. ЯМЩИКОВ

*Институт лазерных физических исследований, РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров,
Россия*

**ВЛИЯНИЕ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ НА КИНЕТИКУ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ И ПЕРЕНОС
ИЗЛУЧЕНИЯ НАКАЧКИ**

Описан алгоритм, позволяющий исследовать задачи, связанные с кинетикой населенностей энергетических уровней с учетом переноса спонтанного излучения в цилиндрической геометрии. На примере среды, состоящей из атомов натрия и гелия, проведен анализ уравнений переноса излучений и скоростных уравнений. Продемонстрировано влияние спонтанного излучения на кинетику энергетических уровней и на перенос излучения накачки.

V.M. YAMSHCHIKOV

Institute of lasers and physical investigations, RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

**INFLUENCE OF SPONTANEOUS RADIATION IN CYLINDRICAL
GEOMETRY ON ENERGY LEVELS KINETICS AND TRANSFER
OF PUMPING RADIATION**

The algorithm for investigation kinetics of energy levels population taking into account transfer of spontaneous radiation in cylindrical geometry is described. On the example of the environment consisting of sodium and helium atoms, the analysis of transfer radiations and high-speed equations is carried out. Influence of spontaneous radiation on energy levels kinetics and transfer of pumping radiation is shown.

В научной литературе рассматриваются задачи кинетики, в которых спонтанное излучение свободно распространяется через среду, не взаимодействуя с ней [1-5]. В практических случаях возникает ситуация, когда средняя длина свободного пробега фотона в резонансно поглощающей среде мала по сравнению с характерным размером среды. Это приводит к тому, что рожденный в глубине среды спонтанный фотон будет иметь высокую вероятность повторного поглощения невозбужденным атомом. Он будет «блуждать» от атома к атому до тех пор, пока не достигнет границы. Происходит накопление спонтанных фотонов в среде. Такой эффект называется пленением излучения и он может сильно влиять на кинетику населенностей [6].

Геометрия задачи – диск толщины b_z и радиуса R , состоящий из атомов натрия и гелия. Пучок излучения, имеющий диаметр D , облучает

поверхность диска. Длина волны излучения соответствует переходу в атоме натрия $3S_{1/2} \rightarrow 3P_{3/2}$.

Излучение накачки начнет заполнять энергетический уровень $3P_{3/2}$. В то же время излучение накачки будет обратно переводить атомы из возбужденного состояния $3P_{3/2}$ в основное, но эти два противоположных процесса будут идти с разной скоростью. Из – за наличия в среде гелия переходы туда и обратно происходят между двумя состояниями тонкой структуры $3P$. Это означает, что уровень $3P_{1/2}$ начнет заполняться. Известно, что атомы не могут долго находиться в возбужденном состоянии, и спустя время, равное времени жизни, атом вернется в основное состояние $3S_{1/2}$, испуская фотон в произвольном направлении. Если на пути этого фотона окажется атом в основном состоянии, то фотон поглотится им.

Процессы кинетики, описанные выше, математически представляются в виде скоростных уравнений [1]. Перенос спонтанного излучения учитывается в рамках диффузионного приближения [6-8]. Полученная задача является квазитрехмерной, не имеет аналитического решения. Была решена численно методом продольно – поперечной прогонки [9-11].

Из результатов расчета сделаны следующие выводы:

1) Спонтанное излучение существенно выходит за пределы накачиваемой области.

2) Интенсивность спонтанного излучения в рассматриваемой задаче сопоставима с излучением накачки. В некоторых точках пространства плотность спонтанных фотонов выше плотности фотонов накачки.

3) За счет эффекта опрозрачивания, излучение накачки поглощается заметно слабее в случае учета переноса спонтанного излучения.

В случае отражающих границ информация о распределении спонтанного излучения позволит вычислять тепловые потоки для задачи теплопроводности.

Список литературы

1. Звелто О. Принципы лазеров / Пер. под науч. Ред. Т.А. Шмаонова. 4-е издание. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 720 с.
2. Андрианов Е.С., Пухов А.А. Квантовая теория лазера: учебное пособие / Е.С. Андрианов, А.А. Пухов. – М.: МФТИ, 2014. – 90 с.
3. Коротеев Н.И., Шумай И.Л. Физика мощного лазерного излучения. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1991. – 312 с.
4. Ерошенко В.А. Основы физики лазеров: учеб. Пособие / В.А. Ерошенко; Рос. Федер. Ядер. Центр – ВНИИЭФ. – Саров: 2002. – 64 с.
5. Тарасов Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. – М.: Радио и связь. 1981. – 440 с.

6. Ямщиков В.М., Рогачев В.Г., Кудряшов Е.А., Качалин Г.Н. Перенос и пленение резонансного излучения в двухуровневой системе//Оптика и спектроскопия. 2020. Том 128. № 8. С. 1160.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П., Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. - 3-е изд., исправл. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 656 с.
8. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, - 2004. – 544 с.
9. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: Учебник. – 7-е изд. М.: Изд-во МГУ; Изд-во «Наука», 2004.
10. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса : учеб. Пособие. – Томск : СТТ, 2016. – 92 с.
11. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А., Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие./ Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

Б.В. РУМЯНЦЕВ¹, Е.И. МАРЕЕВ^{1,2}, А.С. БЫЧКОВ^{1,3},
А.А. КАРАБУТОВ³, Е.Б. ЧЕРЕПЕЦКАЯ^{1,3}, В.А. МАКАРОВ^{1,3}
Ф.В. ПОТЁМКИН¹

¹*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1/2,
119991, Москва, Россия.*

²*Институт фотонных технологий ФНИЦ "Кристаллография и Фотоника"
РАН, 108840, Троицк, Россия.*

³*Национальный Исследовательский Технологический Университет (НИТУ)
«МИ-СиС», Ленинский проспект, 6, 119049, Москва, Россия.*

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННОГО И УДАРНО- ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СФОКУСИРОВАННОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ОБЪЁМОМ СРЕДЫ

Разработана экспериментальная оптоакустическая методика, позволяющая измерить пространственное распределение плотности электронов плазмы (см⁻³) и энерговклада (кДж/см³) в области плазмообразования при локальной генерации лазерно-индуцированной плазмы в объёме конденсированной среды. Исследовано воздействие лазерно-индуцированной ударной волны на поверхность образца кремния (Si) и определены условия для возбуждения фазового перехода на его поверхности при ударно-волновом воздействии.

B. V. RUMIANTSEV¹, E. I. MAREEV^{1,2}, A. S. BYCHKOV^{1,3},
A. A. KARABUTOV³, E. B. CHEREPETSKAAYA^{1,3}, V. A.
MAKAROV^{1,3}, F. V. POTEKIN¹

¹*Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory
bld.1/2, 119991 Moscow, Russia.*

²*Institute of Photonic Technologies FSRC "Crystallography and Photonics," RAS,
108840, Troitsk, Russia.*

³*The National University of Science and Technology MISiS, Leninski Prospect 6,
119049, Moscow, Russia.*

DIAGNOSTICS OF PLASMA AND SHOCK-WAVE EFFECTS UNDER EXTREME IN-TERACTION OF FOCUSED FEMTOSECOND LASER RADIATION WITH THE BULK OF THE MEDIUM

The experimental optoacoustic method aimed to measure the spatial distribution of the plasma electron density (cm⁻³) and energy deposition density (kJ/cm³) under local generation of the laser-induced plasma is developed. The impact of the laser-

induced shock wave on the surface of the silicon (Si) sample is studied. The conditions required for the excitation of the phase transition on the silicon sample surface under shock wave impact is determined.

Фемтосекундный лазерный микромашиining объёма прозрачных материалов в настоящее время находится на этапе экспериментальных исследований и имеет потенциал для закрепления в качестве современного технологического метода микро- и нанообработки различных материалов. Особый интерес в области фемтосекундной микрообработки материалов представляет возможность создания волноводов в объёме полупроводников [1], применение фемтосекундных лазеров в области медицины и биологии [2], а также возможность повышения точности и скорости выполнения технологических задач по обработке материалов [3].

По сравнению с традиционным наносекундным лазерным микромашиiningом, более высокая скорость ввода энергии в малый объём среды при фемтосекундном лазерном воздействии позволяет произвести более локализованное воздействие на среду, свободное от эффектов диффузии тепла (non-thermal melting [4]), а также добиться новых режимов взаимодействия лазерного излучения с веществом (например, фемтосекундной филаментации [5]). Для реализации обратной связи в процессе фемтосекундной лазерной микрообработки необходимо обеспечить возможность диагностики процессов, оказывающих непосредственное влияние на среду. В качестве таких фундаментальных процессов выступают генерация лазерно-индуцированной плазмы и формирование ударной волны. Таким образом, в связи с необходимостью обеспечения обратной связи в процессе фемтосекундного лазерного микромашиiningа, представленная работа посвящена диагностике данных процессов.

Для диагностики лазерно-индуцированной плазмы в рамках проведённых исследований разработан и реализован метод трёхмерной оптоакустической томографии лазерно-индуцированной плазмы [6], позволяющий получить трёхмерное распределение концентрации электронов плазмы (Рис.1А) и энерговклада [7] с разрешением 2 мкм. Методика основана на совместном применении метода двумерной акустической томографии [8] и техники теневой фотографии [9]. Разработанная методика позволяет визуализировать распределение концентрации электронов лазерноиндуцированной плазмы и определять области с наибольшим вложением энергии, что свидетельствует о возможности использования данной методики в качестве средства диагностики плазменного воздействия на среду.

Для диагностики ударно-волнового воздействия на среду был использован метод теневой фотографии (Рис.1Б). На его основе была исследована зависимость давления фронта ударной волны от времени, прошедшего с момента генерации плазмы, и энергии возбуждающего лазерного импульса. На основе данной зависимости и численного моделирования с использованием подходов молекулярной динамики установлено, что лазерно-индуцируемая ударная волна способна возбуждать фазовый переход (кубическая фаза – β -Sn фаза) на поверхности образца кремния. Также построена диаграмма энергия – расстояние, позволяющая определить энергию лазерного импульса и расстояние от плазмы до образца кремния, необходимые для возбуждения данного фазового перехода на его поверхности [10].

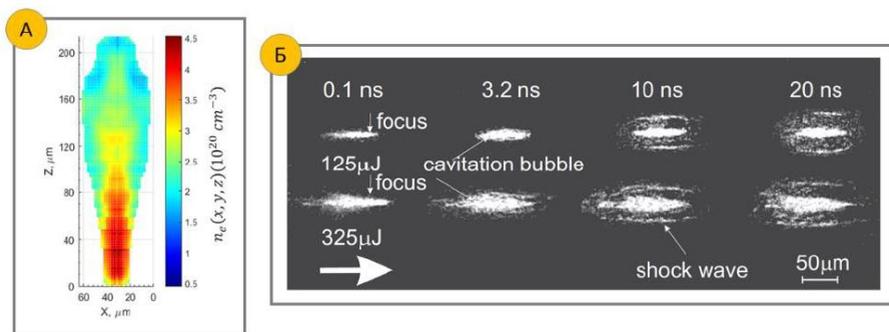


Рис.1. А) Центральное сечение трёхмерного распределения плотности электронов лазерно-индуцированной плазмы. Б) Динамика лазерно-индуцированной ударной волны

Проведенные исследования открывают новые возможности для диагностики взаимодействия мощного сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения с конденсированной средой, а также демонстрируют возможность ударно-волновой лазерной обработки поверхности полупроводников.

Исследования поддержаны грантом РФ № 17–72-20130 (плазменное воздействие) и грантами РФФИ № 18-32-20016, 19-29-12037 (ударно-волновое воздействие). Румянцев Б.В. является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики "БАЗИС".

Список литературы

1. Chambonneau M. et al. Writing waveguides inside monolithic crystalline silicon with nanosecond laser pulses //Optics letters. – 2016. – Т. 41. – №. 21. – С. 4875-4878.
2. Gabel C. V. Femtosecond lasers in biology: nanoscale surgery with ultrafast optics //Contemporary Physics. – 2008. – Т. 49. – №. 6. – С. 391-411.

3. Butkus S. et al. Rapid cutting and drilling of transparent materials via femtosecond laser filamentation // *Journal of Laser Micro Nanoengineering*. – 2014. – Т. 9. – №. 3. – С. 213.
4. Naghilou A., Armbruster O., Kautek W. Laser-Induced Non-thermal Processes // *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering*. – 2020. – С. 1-23.
5. Kandidov V. P., Shlenov S. A., Kosareva O. G. Filamentation of high-power femtosecond laser radiation // *Quantum Electronics*. – 2009. – Т. 39. – №. 3. – С. 205.
6. Rumiantsev B. V. et al. Three-dimensional hybrid photoacoustic imaging of the laser-induced plasma and deposited energy density under optical breakdown in water // *Applied Physics Letters*. – 2021. – Т. 118. – №. 1. – С. 011109.
7. Mareev E. I. et al. A comprehensive approach to the characterization of the deposited energy density during laser-matter interactions in liquids and solids // *Measurement Science and Technology*. – 2020. – Т. 31. – №. 8. – С. 085204.
8. Potemkin F. V. et al. Two-dimensional photoacoustic imaging of femtosecond filament in water // *Laser Physics Letters*. – 2018. – Т. 15. – №. 7. – С. 075403.
9. Rumiantsev B. et al. Photoacoustic and optical imaging of the femtosecond filament in water // *Nonlinear Optics and Applications XI*. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Т. 11026. – С. 1102606.
10. Мареев Е. И., Румянцев Б. В., Потемкин Ф. В. Исследование параметров лазерно-индуцированных ударных волн для задач лазерной ударной обработки кремния // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2020. – Т. 112. – №. 11. – С. 780-786.

Д.С. ЛУТОШИНА, А.А. МОРОЗОВА, В.В.РОМАНОВ,
Г.В. ОДИНЦОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА, ОБРАЗОВАННЫХ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В данной работе рассматривается метод окрашивания поверхностей изделий из серебра за счет плазмонных эффектов в лазерно-индуцированных наночастицах, сформированных наносекундной длительностью импульса. Показан метод управления колориметрическими свойствами поверхности путем моделирования спектров отражения серебряной поверхности. Моделирование позволяет анализировать плазмонные свойства наночастиц, синтезированных методом лазерной абляции, в зависимости от размера наночастиц, их концентрации и объема.

D.S. LUTOSHINA, A.A. MOROZOVA, V.V. ROMANOV,
G.V. ODINTSOVA

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

PROPERTIES OF SILVER NANOPARTICLES FORMED BY DIRECT LASER ABLATION WITH NANOSECOND PULSES

In this paper, we consider the method of coloring surfaces made of silver due to plasmon effects in laser-induced nanoparticles formed with nanosecond pulse duration. Methods for controlling the colorimetric properties of a surface by modeling the reflection spectra of a silver surface are also discussed. The simulation allows analyzing the plasmonic properties of nanoparticles synthesized by laser ablation, depending on the size of the nanoparticles, their concentration, and volume.

Изучение возможности получения НЧ драгоценных металлов доступной для промышленности установкой с наносекундной длительностью импульса является важной задачей. Другой важной задачей является изучение свойств получаемых НЧ, чтобы иметь возможность контролировать процесс цветообразования на поверхности продукта. Для исследования была выбрана пластина 4x4 см², содержащая 92,5% серебра и 7,5% меди. Эксперименты проводились на установке на основе волоконного иттербиевого лазера с длиной волны $\lambda = 1064$ нм. В результате лазерной абляции серебра при постоянной длительности импульса ($\tau = 14$ нс) и частоте следования

импульсов ($f = 75 \text{ кГц}$) в диапазоне скоростей сканирования ($V = 200\text{--}400 \text{ мм/с}$ с шагом 50 мм/с) и средней мощности излучения лазера ($P = 7,2\text{--}8,0 \text{ Вт}$ с шагом $0,2 \text{ Вт}$) была получена цветовая палитра. Предполагается, что наночастицы образуются в парогазовой фазе при абляции материала мишени. В результате наночастицы имеют различные размеры и распределение.

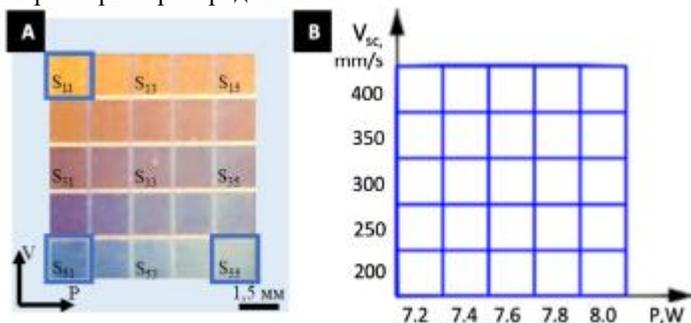


Рис. 1. Фото поверхности серебра после лазерного воздействия (А).

Параметры лазерного облучения для создания цветовой палитры (Б).

Затем был проведен анализ морфологии поверхности с использованием изображений SEM. Средний размер наночастиц (d) равен 15 нм для S11, 24 нм для S51, 43 нм для S55; концентрация наночастиц (N) составила 4252 шт / мкм^2 для S11, 1560 шт / мкм^2 для S51 и 969 шт / мкм^2 для S55.

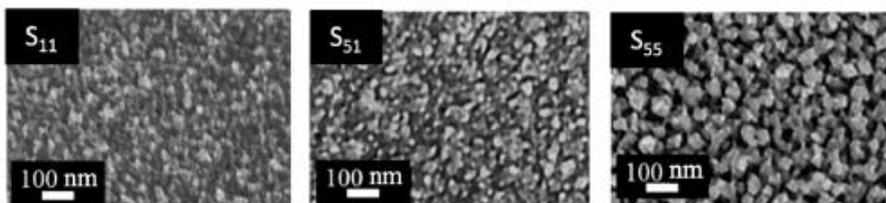


Рис. 2. СЭМ снимки поверхности серебра после лазерного воздействия.

Видно, что повышение температуры лазерного воздействия (увеличение мощности в сочетании с уменьшением скорости сканирования) приводит к увеличению среднего размера наночастиц и, как следствие, их концентрации.

Таким образом, наночастицы серебра с плазмонным резонансом в видимой области спектра были синтезированы на поверхности серебра в процессе лазерной абляции с длительностью импульса наносекундной длительности. Моделирование спектров отражения серебряной подложки со слоем наночастиц показало высокую корреляцию с

данными, полученными в ходе эксперимента, что позволяет сделать вывод о возможности прогнозирования экспериментальных результатов с помощью теоретических исследований.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-79-10208.

А.С. БЕЛОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, А.П. КУЗНЕЦОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАЗРАБОТКА ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА «МИФИСТ»

Электронная плотность является одним из основных параметров, используемых для контроля режимов работы токамаков. Внесение зондов в долгоживущую высокотемпературную плазму не представляется возможным, поэтому для измерения электронной плотности используются дистанционные оптические методы. Для измерения электронной плотности плазмы на малом сферическом токамаке «МИФИСТ» будет использоваться гетеродинный интерферометр на длине волны 10,6 мкм.

A.S. BELOV, K.L. GUBSKIY, A.P. KUZNETSOV.

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

DESIGN OF HETERODYNE INTERFEROMETER TO LINEAR PLASMA DENSITY MEASUREMENTS ON “MEPHIST” TOKAMAK

Electron density is one of the fundamental parameters used to control the operating of tokamaks. The incorporation of probes into a long-lived high-temperature plasma is impossible; therefore, remote optical methods are used to measure the electron density. A heterodyne interferometer at a wavelength of 10.6 μm will be used to measure the electron density of the plasma at the small spherical tokamak "MEPHIST".

После запуска в рабочем режиме, в токамаке «МИФИСТ» ожидаются следующие параметры плазмы: электронная плотность $10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, скорость нарастания плотности 0 - 10^{12} за 5 мс, время жизни плазмы ~ 30 мс [1], время осцилляций в плазме $1 \div 10$ мкс.

Для исследования данной плазмы был разработан и создан гетеродинный интерферометр с длиной волны излучения 10,6 мкм, что при длине диагностической хорды, составляющей примерно 70 см, дает фазовый сдвиг $\sim 0,12$ радиан, при плотности плазмы 10^{13} см^{-3} . Частотное смещение в интерферометре обеспечивается акустооптическим модулятором, смещающим излучение на частоту 40 МГц. Сигнал регистрируется CdHgTe фотодиодом, работающим при криогенных температурах.

На первом этапе для обработки гетеродинных сигналов будет использоваться схема прямой оцифровки с последующей цифровой обработкой. Такой подход обеспечивает высокую точность и временное разрешение, что требуется для отработки режимов работы токамака. В дальнейшем, для автоматизации эксперимента будет создан квадратурный аналоговый фазометр. Его использование позволит получать данные об электронной плотности в режиме реального времени и использовать их в петле обратной связи индуктора токамака, как это реализовано на большинстве существующих крупных плазменных установок [2].

Расчётная точность интерферометра в измерении электронной плотности плазмы в разработанной схеме составляет 10^{10} см^{-3} при временном разрешении менее 10 нс.

Список литературы

1. Kurnaev V.A. et al. The Project of MPhIST Tokamak // Physics of Atomic Nuclei, 2019. Vol. 82, № 10. P. 1329–1331.
2. Kornejew P. et al. Design of multichannel laser interferometry for W7-X // Review of Scientific Instruments, Vol. 77, № 10. P. 10F128.

Н.Д. БУХАРСКИЙ¹, Ю.В. КОЧЕТКОВ¹, Ф.А. КОРНЕЕВ^{1,2}

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

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

ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ ОПТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ: ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В работе рассматривается экспериментальная реализация протонной радиографии для диагностики электромагнитных полей, создаваемых при облучении миниатюрных структурированных мишеней мощными лазерными импульсами. Обсуждаются основные особенности анализа экспериментальных данных и возможные подходы к их обработке.

N.D. BUKHARSKI¹, I.U.V. KOCHETKOV¹,
F.A. KORNEEV^{1,2}

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

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

PROTON RADIOGRAPHY OF OPTICAL MAGNETIC FIELD GENERATORS: PRACTICAL IMPLEMENTATION AND EXPERIMENTAL DATA PROCESSING SPECIFICS

This work considers experimental implementation of proton radiography for diagnostics of electromagnetic fields, induced in miniature structured targets under the action of intense laser pulses. Main data processing specifics and prospective methods of analysis are discussed.

Создание источников сильных квазистационарных магнитных полей представляет большой интерес в связи с возможностью их использования для решения широкого круга задач, например управления потоками высокоэнергетичных заряженных частиц или создания замагниченной плазмы, позволяющей моделировать различные астрофизические процессы в лабораторных условиях. При этом ряд приложений требует, чтобы источник магнитного поля был достаточно компактным и обеспечивал генерацию магнитных полей в несколько сотен Тл. Этим требованиям вполне способны удовлетворить оптические генераторы магнитного поля на

основе структурированных мишеней, например мишеней типа «улитка» [1, 2].

В работе рассмотрена схема реализации протонной радиографии для исследования этих и других типов мишеней в пикосекундном режиме воздействия. Оптический генератор зондируется диагностическим протонным пучком. Электромагнитные поля мишени отклоняют протоны от первоначальных траекторий, в результате чего в пучке формируется сложная структура, которая регистрируется в виде двумерных изображений при помощи стопки радиохромных пленок. Для восстановления магнитного поля необходимо решить трехмерную обратную задачу, однако сделать это напрямую не представляется возможным. Электромагнитные поля определяются при помощи метода пробных частиц, основанного на численном расчете радиограмм с использованием различных модельных распределений магнитного и электрического поля с итеративно подбираемыми параметрами.

Для подбора коэффициентов модельных распределений может быть использовано несколько методов. В данной работе обсуждается два возможных подхода - на основе сравнения отдельных геометрических параметров сформированной в протонном пучке структуры и корреляционного анализа, и на основе нейросетевых алгоритмов [3]. Рассмотрены основные особенности этих методов и в качестве сравнения приведены результаты обработки каждым из них радиограмм, полученных в ходе эксперимента на петаваттном лазерном комплексе PHELIX в GSI, г. Дармштадт.

Список литературы

1. Korneev Ph., d'Humières E. and Tikhonchuk V. // Phys. Rev. E. 2015. Vol. 91. Iss. 4. P. 043107.
2. Law K.F.F. *et al.* // Phys. Rev. E. 2020. Vol. 102. Iss. 3. P. 033202.
3. Chen N.F.Y. *et al.* // Phys. Rev. E. 2017. Vol. 95. Iss. 4. P. 043305.

В.Д. ВОРОНОВ¹, Э.Д. ИШКИНЯЕВ^{1,2}, Е.В. ХРИПТОВИЧ²,
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹

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

² *ООО Научно-технического объединения «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ

В рамках проведенной работы была построена теоретическая компьютерная модель процесса лазерной закалки высокоуглеродистой стали в среде Comsol Multiphysics с применением различных технологических режимов обработки. Проведены эксперименты для корректировки полученной модели и ее верификации. Итоговая модель была проверена в широком диапазоне режимов термообработки. Результаты показывают, что модель с высокой точностью описывает экспериментально полученные данные на всех исследованных режимах обработки без значительного оплавления поверхности.

V.D. VORONOV¹, E.D. ISHKINYAEV^{1,2}, E.V. KHRIPTOVICH², V.N.
PETROVSKIY¹

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

² *Scientific and Technical Association "IRE-Polyus" LLC, Fryazino, Russia*

MODELING OF LASER THERMAL HARDENING PROCESS

In the current work a theoretical computer model of laser thermal hardening process of high-carbon steel under various processing modes was built in the Comsol Multiphysics environment. Experiments were carried out to correct the resulting model and verify it. The final model was tested over a wide range of processing modes. The results show that the model describes with high accuracy the experimentally obtained data for all investigated processing modes without significant surface melting.

Вследствие существования огромного количества различных по свойствам материалов и характера их взаимодействия с лазерным излучением, целесообразно предварительно проводить расчет результата их обработки, используя верифицированную модель. Такой подход позволяет подобрать подходящий диапазон технологических параметров, необходимых для получения требуемых свойств, а также оценить глубину ЗТВ с минимальным количеством экспериментальных данных.

В данной работе в среде моделирования Comsol Multiphysics путём решения трёхмерных нестационарных нелинейных уравнений

теплопроводности рассчитывались температурные поля, индуцированные лазерным излучением. Зная распределение температуры в объеме подложки, можно оценить геометрические параметры области закалки по изотерме, соответствующей критической точке A_{c3} , и зону оплавления по изотерме с температурой плавления $T_{пл}$. Считается, что скорость охлаждения при лазерной обработке всегда превышает значения, необходимые для превращения аустенита в мартенсит. В работе моделировался процесс обработки высокоуглеродистой стали марки 9ХС, часто встречающейся в инструментальной промышленности, при различных мощностях и диаметрах лазерного пятна. По результатам расчета математической модели получена ширина и глубина зоны закалки после воздействия лазерного излучения на обрабатываемую подложку, а также выполнено построение графиков температур в характерных точках на поверхности образца.

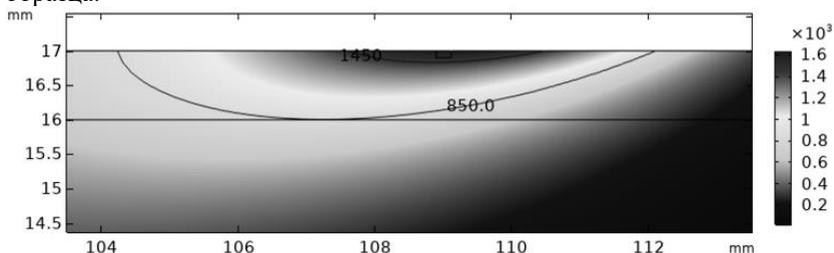


Рис. 1. Температурное распределение в подложке при обработке лазерным лучом.

На установке, оснащенной высокомогным волоконным лазером мощностью до 10 кВт, были проведены эксперименты для верификации построенной компьютерной модели. Проверка соответствия теоретических и реальных значений производилась путем сравнения температур, полученных с применением тепловизора в различных характерных точках на поверхности материала. Вторым параметром сравнения были размеры области закалки, которые исследовались на макрошлифах с помощью оптического микроскопа.

Для точного расчета индуцированных температурных полей необходимо знать физические свойства материала в зависимости от температуры и учитывать все процессы фазовых переходов, происходящих в структуре. Так как при моделировании невозможно учесть всех особенностей процесса обработки существует необходимость корректировки свойств материала. После уточнения построенной модели на основе первых экспериментов ее

работоспособность была проверена в широком диапазоне режимов и сходилась с реальными значениями с высокой точностью.

А.С. ЩЕКИН^{1,2}, Д.Р. ГАШИГУЛЛИН¹, С.А. ГЛАЗЫРИНА¹,
А.А. ГАВРИКОВ², В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, А.А. ОРЕШКИН²

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

²*ООО «НТО ИРЭ-Полус», Фрязино, Россия*

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ РЕЗКЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Произведена теоретическая оценка распространения тепла, которая позволяет определить размер зоны термического влияния (ЗТВ) и глубину испарения материала в композитном полимерном материале (стеклопластик) при воздействии непрерывного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм. Оценка производилась путем решения уравнения теплопроводности Фурье при лазерном нагреве. В результате были получены аналитическая модель и компьютерная мультифизическая симуляция распространения тепла в стеклопластике, а также проведена их экспериментальная проверка.

A.S. SHCHEKIN^{1,2}, D.R. GASHIGULLIN¹, S.A. GLASYRINA¹,
A.A. GAVRIKOV¹, V.N. PETROVSKIY¹, A.A. ORESHKIN²

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

²*NTO «IRE-Polus», Fryazino, Russia*

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE HEAT AFFECTED ZONE IN CUTTING GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC WITH CW FIBER LASER

The heat propagation has been theoretically estimated, making it possible to determine the size of the heat affected zone (HAZ) and the depth of material evaporation in glass fiber reinforced plastic (GFRP) under the influence of cw-laser radiation with a wavelength of 1.06 μm . The estimation was made by solving the Fourier's law of heat conduction under laser heating. As a result, the analytical model of heat propagation and multiphysics simulation obtained was proven by the experiment.

Стеклопластики – вид полимерного композиционного материала, где армирующим веществом является стеклянное волокно. За счет использования стеклянного волокна значительно повышаются механические свойства изделий из стеклопластика. За счет уникальных механических свойств изделия из стеклопластика широко применяются в машиностроении, строительстве и в создании огнестойких панелей.

Из-за неоднородности компонентов композитных материалов и не изотропности их свойств существуют сложности при обработке стеклопластика. При использовании традиционных методов обработки часто теряются прочностные характеристики из-за различных повреждений (Расслоение, растрескивание, вытягивание волокна). Альтернативным способом обработки может являться использование лазерного излучения. Использование лазерного излучения имеют такие преимущества как отсутствие расходных материалов и отсутствие механического контакта с заготовкой, но при этом во время использования лазерного излучения формируется зона термического влияния (ЗТВ), которая уменьшает прочностные характеристики материала, поэтому важным является определение факторов, которые влияют на её величину и минимизация области ЗТВ.

Особенно хорошо себя показывает использование стратегии многопроходной лазерной резки с уширением канала реза [1], но при этом данная технология включает в себя контроль и зависимость между собой множества параметров обработки и нуждается в оптимизации, в чем может помочь теоретическая оценка распространения тепла и время остывания материала после обработки.

В данной работе была произведена теоретическая оценка размера ЗТВ при помощи решения уравнения теплопроводности Фурье в случае лазерного нагрева. В результате было получено упрощенное аналитическое выражение зависимости температуры поверхности от времени и координаты при нагреве в до испарительном и в испарительном режимах. Также была построена компьютерная мультифизическая модель нагрева в ПО COMSOL и проведена экспериментальная проверка результатов.

Для экспериментальной проверки в работе использовалась установка на базе непрерывного волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1,06 мкм мощностью 300 Вт с двухосевым гальваносканером.

В качестве исследуемого материала использовался композитный материал с полимерной матрицей из полиэфирной смолы армированный стекловолокном. Оценка качества проводилась по измерению зоны ЗТВ и наличию растрескивания и расслоения в области обработки.

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

Р.Р. КОКОЕВ, Ю.В. КАРГИНА, Г.В. ТИХОНОВСКИЙ, А.Ю.
ХАРИН, А.А. ПОПОВ, М.В. ШЕСТАКОВ, В.Ю. ТИМОШЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ, МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ

В работе были синтезированы наночастицы кремния, легированные железом, при помощи метода фемтосекундной лазерной абляции в воде и ацетоне. Полученные коллоидные растворы были исследованы при помощи методов рентгенофазового анализа, рамановской микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, а также были проведены измерения зависимости величины намагниченности от величины приложенного магнитного поля. Указанные методы показали, что синтезированные образцы содержат наночастицы кристаллического кремния и наночастицы некоторой аморфной фазы с размерами в несколько десятков нанометров. Магнитные измерения подтвердили присутствие ферромагнитной фазы в образцах. Мы полагаем, что полученные наночастицы перспективны для использования в биомедицине.

R.R. KOKOEV, YU.V. KARGINA, G.V. TIKHONOVSKIY, A.YU.
KHARIN, A.A. POPOV, M.V. SHESTAKOV, V. YU.
TIMOSHENKO

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

METHODICAL ERRORS CAUSED BY SUPERPOSITION OF ELECTRICAL AND OPTICAL SIGNALS IN A HETERODYNE LASER INTERFEROMETER

In this work, iron doped silicon nanoparticles were synthesized using the method of femtosecond laser ablation in water and acetone. The resultant colloidal solutions were investigated by means of the methods of X-ray Diffraction analysis, Raman microscopy, scanning electron microscopy and magnetic measurements. The indicated methods show the synthesized samples contain crystalline silicon nanoparticles and some nanoparticles of amorphous phase with sizes of several tens of nanometers. Magnetic measurements confirmed the presence of a ferromagnetic phase in the samples. We think the obtained nanoparticles are promising for use in biomedicine.

Коллоидные кремниевые наночастицы активно привлекают внимание исследователей благодаря их многофункциональным

свойствам и перспективному применению в биомедицине [1]. Так в работах [2, 3] были синтезированы наночастицы кремния, легированные ионами железа, при помощи плазма-абляционных методов. Синтезированные наночастицы оказались перспективными для применения в качестве контрастных агентов для магнитной резонансной томографии (МРТ) и противоопухолевой терапии. В работе [4] наночастицы кремния, легированные железом, были синтезированы путём лазерно-абляционного синтеза в жидкости. Далее было установлено, что цитотоксичность полученных наночастиц не превышает 20%. Настоящее исследование является продолжением исследования из работы [4] с целью определить химический и структурный состав полученных образцов, а также их перспективность для применения в качестве контрастных агентов для магнитной резонансной томографии (МРТ).

В данной работе наночастицы кремния, легированные железом, при были синтезированы при помощи метода фемтосекундной лазерной абляции в воде и ацетоне. Состав и свойства полученных наночастиц был исследован путём применения ряда физико-химических методов исследования. Рентгено-фазовый анализ и рамановская спектроскопия показали, что в состав образцов входят наночастицы кристаллического кремния и наночастицы неизвестной аморфной фазы. Сканирующая электронная микроскопия выявила, что кремниевые наночастицы в воде имеют хлопьеобразную и сферическую формы. Кремниевые наночастицы в ацетоне имеют сферическую форму. Магнитные измерения показали, что намагниченность насыщения составляла $6 \text{ см}^3/\text{г}$ и $0.06 \text{ см}^3/\text{г}$ при напряженности магнитного поля $\sim 2000 \text{ Э}$ для наночастиц в воде и ацетоне, соответственно. Все образцы демонстрировали присутствие магнитного гистерезиса, что указывает на их ферромагнитную природу. Мы полагаем, что полученные наночастицы перспективны для использования в биомедицине.

Список литературы

1. Kabashin A.V., Singh A., Swihart M. T. and others// ACS Nano. 2019. Vol. 13, P. 9841 – 9867.
2. Sharonova N.V., Svirshchevskaya E.V., Popov A.A. and others// J. Bioorg. Chem. 2020. Vol. 46, № 6, P. 736 – 745.
3. Kargina Yu.V., Perepukhov A.A., Kharin A.Yu. and others// Phys. Status Solidi A. 2019, V. 216, № 14, P. 1800897.
4. Kargina V.Yu., Zinovyev S.M., Perepukhov A.A. and others// Funct. Mater. Lett. 2020, V. 13, № 4, P. 2040007.

Благодарности

Коллектив авторов благодарен Российскому научному фонду (проект № 19-72-30012) за финансовую поддержку научного исследования.

О.Б. АНАНЬИН, Р.Ш. РАМАКОТИ, А.П МЕЛЕХОВ,
В.В.КРАВЧЕНКО, И.А. ГЕРАСИМОВ, Г.С. БОГДАНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

С помощью ионизации приповерхностного слоя вещества сфокусированным мягким рентгеновским излучением лазерной плазмы и электронами, пришедшими из глубоких слоев, получены масс-спектры поверхностного слоя различных соединений.

O.B. ANANIN¹, R.S. RAMAKOTI¹, A.P. MELEKHOV¹, V.V.
KRAVCHENKO¹, I.A. GERASIMOV¹, G.S. BOGDANOV¹
*¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

ON THE POSSIBILITY OF USING SOFT X-RAY LASER PLASMA RADIATION FOR STUDYING THE COMPOSITION OF ORGANIC COMPOUNDS

The mass spectra of the surface layer of various compounds were obtained by ionizing the near-surface layer of a substance by focused soft X-ray radiation from a laser plasma and electrons coming from deep layers.

Как известно, МРИ лазерной плазмы поглощается в приповерхностном слое глубиной порядка 1÷2 мкм. В результате вторичной электронной ионизации, часть освободившихся электронов, обладающие определенным энергетическим спектром, ионизируют молекулы на поверхности образца, разрушая химические связи. Для регистрации образовавшихся ионов было приложено положительное выталкивающее напряжение непосредственно к образцу и зарегистрированы ионизированные фрагменты исследуемого образца на времяпролетном масс-анализаторе.

В ходе проведения эксперимента, образец облучался сфокусированным интенсивным МРИ от лазерной плазмы. Фокусировка МРИ в пятно диаметром примерно 2 мм и защита образца

от других продуктов плазмообразования производилась за счет применения рентгеновского концентратора [1]. Длительность импульса составляет ~ 20 нс с энергией в импульсе МРИ порядка 1 мДж при спектре МРИ от 60 до 1000 эВ и мощности $5 \cdot 10^4$ Вт [2].

В вакуумной камере образец помещался на медную проводящую пластинку, к которой было приложено положительное напряжение, с последующей фиксацией посредством клея либо зажимов. Схема крепления приведена на рисунке 1. В ходе работы были получены результаты для нескольких веществ таких как: глицин, кофеин и тефлон и др.

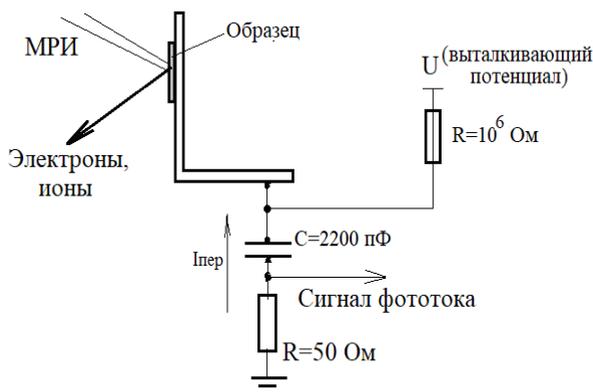


Рис. 1. Схема крепления образца

Анализ полученных масс-спектров свидетельствует о существенном вкладе в полученные результаты ионов остаточных газов. Но, несмотря на это, нам удалось выделить характерные участки на масс-спектрах, которые соответствуют ожидаемым для анализируемых веществ.

Список литературы

1. Р. Ш. Рамакоти, О. Б. Ананьин, А.П. Мелехов и др.// Ядерная физика и инжиниринг, 2019
2. Знаменский В.Ю., Лазерно-плазменный волноводный источник мягкого рентгеновского излучения. Автореферат дис. канд. физ.-мат. Наук М.: МИФИ, 1994 г.

К.С. ЛУКЪЯНОВ, К.Л.ГУБСКИЙ, И.Ю. ТИЩЕНКО
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ КСПУ-Т

Представлена система измерения временной динамики электронной плотности плазменного потока на установке КСПУ-Т. Система создана на основе волоконного гетеродинного интерферометра. Приведены первые результаты экспериментов. Исследовано влияние вибраций и электрических наводок на результат измерений. Оценен уровень помех, создаваемый импульсными источниками высокого напряжения.

K.S. LUKYANOV, K.L. GUBSKIY, I.Y. TISHCHENKO
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

DEVELOPMENT OF THE PLASMA ELECTRON DENSITY MEASUREMENT SYSTEM ON QSPA-T

A system for measuring the electron density of a plasma based on a fiber heterodyne interferometer is presented and the first results of experiments are presented. The influence of vibrations and electromagnetic field on the measurement result is investigated. The level of noise generated by high-voltage pulsed sources is estimated.

Возрастающий интерес к исследованию дальнего космоса [1][2] создает запрос на разработку и создание новейших ракетных систем, способных быстро доставлять большие грузы и экипажи к исследуемым космическим телам.

Использование классических термохимических ракетных двигателей для межпланетных перелетов нецелесообразно ввиду фундаментального ограничения удельного импульса данных типов установок [3]. В настоящее время в мире ведутся работы по созданию электрореактивных ракетных двигателей (ЭРД) с большой тягой [4][5]. К такому типу установок относится плазменные ракетные двигатели, в которых рабочим телом, создающим реактивную силу, является поток горячей плазмы, разогнанной до скоростей 10-100 км/сек. Изучение устойчивости горения плазмы на разных режимах работы и исследование массового расхода рабочего тела являются необходимыми этапами в разработке плазменного ракетного двигателя с высокой тягой.

Для исследования потока плазмы, создаваемого квазистационарным сильноточным плазменным ускорителем, была разработана двухканальный макет системы измерения электронной плотности на основе волоконного гетеродинного интерферометра с квадратурным фазометром. Была проведена серия измерений электронной плотности потока плазмы на установке КСПУ-Т. Модифицированная система акустической развязки позволила значительно снизить уровень помех связанных с вибрациями оптических элементов. Дальнейшие работы будут направлены на устранение импульсных электрических наводок и увеличение количества каналов до восьми.

Список литературы

1. Witze A. Touch down! NASA's Mars landing sparks new era of exploration. // Nature, Vol 590, 2021.
2. Castelvocchi D. Pluto probe offers fresh view of sun's closest neighbour. // Nature, Vol 582, 2020.
3. M. Lingam, A. Loeb. Limitations of Chemical Propulsion for Interstellar Escape from Habitable Zones Around Low-mass Stars // Research Notes of the (AAS) 2018.
4. F.R. Chang Díaz, J.P. Squire, A.V. Ilin, G.E. McCaskill et al. The development of VASIMR engine. Proceedings of International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA99), Sept. 13-17, 1999, Torino, Italy. 37831. 99-102.
5. F Roland. The X3 100-kW Class Nested-Channel Hall Thruster: Motivation, Implementation, and Initial Performance. PhD dissertation. The University of Michigan. 2014.

А.С. ЩЕКИН^{1,2}, С.А. ГЛАЗЫРИНА¹, А.А. ГАВРИКОВ²,
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, А.А. ОРЕШКИН²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

²ООО «НТО ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ КЕРАМИКИ AL₂O₃ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ

Произведена теоретическая оценка различных стратегий формирования микроструктур на поверхности керамики Al₂O₃ излучением наносекундного лазера. За основу были выбраны модели смачиваемости Венцеля и Касси-Бакстера. Также построены зависимости значения краевого угла смачиваемости от параметров лазерного излучения.

A.S. SHCHEKIN^{1,2}, S.A. GLASYRINA¹, A.A. GAVRIKOV², V.N.
PETROVSKIJ¹, A.A. ORESHKIN²

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

²NTO IRE-Polus, Fryazino, Russia

PULSED LASER MODIFICATION OF AL₂O₃ CERAMICS TO CONTROLLING THE SURFACE WETTABILITY

Different strategies for the fabrication of microstructures on the surface of Al₂O₃ ceramics by nanosecond pulsed laser are theoretically evaluated. The basis wettability models were the Wenzel and Cassie-Baxter. The dependences of the value of the wettability angle on the laser radiation parameters were construction.

Контролирование смачиваемости поверхности имеет широкое применение в различных современных высокотехнологических применениях: самоочищающиеся поверхности, разделение масловодной смеси, имплантология. На данный момент к традиционным способам получения гидрофобных и гидрофильных поверхностей относятся: литография, обработка плазмой, химическое осаждение. Из минусов перечисленных технологий можно выделить высокую стоимость и зачастую сложность нанесения определенного паттерна на поверхность материала. Решением данных проблем может являться лазерное излучение. К преимуществу лазерного излучения можно отнести отсутствие расходных материалов, отсутствие механического и

химического воздействия на поверхность, управляемость создаваемых паттернов на поверхности.

В данной работе в качестве источника излучения использовался твердотельный Nd:YVO₄ лазер с генерацией второй гармоники, средней мощностью 10 Вт и длительностью импульса 25 нс. Диаметр пучка 25 мкм. Позиционирование лазерного пучка производилось при помощи гальваносканирующих зеркал.

Было рассмотрено три стратегии нанесения паттерна на поверхность керамики: столбчатая сетка, одиночные ямки и одиночные пики. Схемы обработки представлены на рис 1.

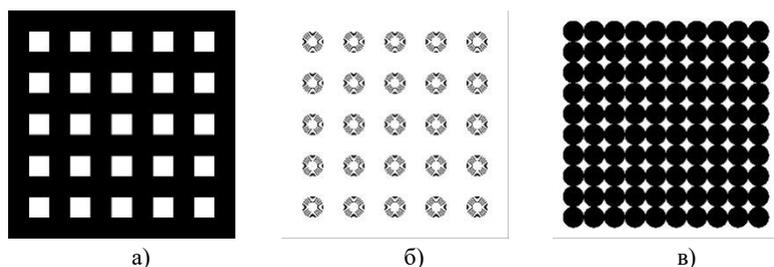


Рис. 1. Наносимые паттерны, а) столбчатая сетка, б) одиночные ямки, в) одиночные пики. Черным показана область обработки. Для случая б) концентрические окружности показывают, что на одну ямку приходится N импульсов.

Для определения краевого угла смачивания капля объёмом 8 мкл наносилась на обработанную поверхность, после чего производилась фотосъемка в микроскоп и измерение тангенциальным методом. При таком методе форма капли представляется как часть контура предполагаемой окружности. Определяется центр предполагаемой окружности, и угол представляет собой угол между касательной и окружностью.

Список литературы

1. Та D, Dunn A, Wasley T et al/ Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications // Applied Surface Science. 2015. Vol. 357 P. 248–254.

А.С. ЩЕКИН^{1,2}, Д.Р. ГАШИГУЛЛИН¹, С.А. ГЛАЗЫРИНА¹,
А.А. ГАВРИКОВ², В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, А.А. ОРЕШКИН²

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

²*ООО «НТО ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия*

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ РЕЗКЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Произведена теоретическая оценка распространения тепла, которая позволяет определить размер зоны термического влияния (ЗТВ) и глубину испарения материала в композитном полимерном материале (стеклопластик) при воздействии непрерывного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм. Оценка производилась путем решения уравнения теплопроводности Фурье при лазерном нагреве. В результате были получены аналитическая модель и компьютерная мультифизическая симуляция распространения тепла в стеклопластике, а также проведена их экспериментальная проверка.

A.S. SHCHEKIN^{1,2}, D.R. GASHIGULLIN¹, S.A. GLASYRINA¹,
A.A. GAVRIKOV¹, V.N. PETROVSKIY¹, A.A. ORESHKIN²

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

²*NTO «IRE-Polus», Fryazino, Russia*

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE HEAT AFFECTED ZONE IN CUTTING GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC WITH CW FIBER LASER

The heat propagation has been theoretically estimated, making it possible to determine the size of the heat affected zone (HAZ) and the depth of material evaporation in glass fiber reinforced plastic (GFRP) under the influence of cw-laser radiation with a wavelength of 1.06 μm . The estimation was made by solving the Fourier's law of heat conduction under laser heating. As a result, the analytical model of heat propagation and multiphysics simulation obtained was proven by the experiment.

Стеклопластики – вид полимерного композиционного материала, где армирующим веществом является стеклянное волокно. За счет использования стеклянного волокна значительно повышаются механические свойства изделий из стеклопластика. За счет уникальных механических свойств изделия из стеклопластика широко применяются в машиностроении, строительстве и в создании огнестойких панелей.

Из-за неоднородности компонентов композитных материалов и не изотропности их свойств существуют сложности при обработке стеклопластика. При использовании традиционных методов обработки часто теряются прочностные характеристики из-за различных повреждений (Расслоение, растрескивание, вытягивание волокна). Альтернативным способом обработки может являться использование лазерного излучения. Использование лазерного излучения имеют такие преимущества как отсутствие расходных материалов и отсутствие механического контакта с заготовкой, но при этом во время использования лазерного излучения формируется зона термического влияния (ЗТВ), которая уменьшает прочностные характеристики материала, поэтому важным является определение факторов, которые влияют на её величину и минимизация области ЗТВ.

Особенно хорошо себя показывает использование стратегии многопроходной лазерной резки с уширением канала реза [1], но при этом данная технология включает в себя контроль и зависимость между собой множества параметров обработки и нуждается в оптимизации, в чем может помочь теоретическая оценка распространения тепла и время остывания материала после обработки.

В данной работе была произведена теоретическая оценка размера ЗТВ при помощи решения уравнения теплопроводности Фурье в случае лазерного нагрева. В результате было получено упрощенное аналитическое выражение зависимости температуры поверхности от времени и координаты при нагреве в до испарительном и в испарительном режимах. Также была построена компьютерная мультифизическая модель нагрева в ПО COMSOL и проведена экспериментальная проверка результатов.

Для экспериментальной проверки в работе использовалась установка на базе непрерывного волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1,06 мкм мощностью 300 Вт с двухосевым гальваносканером.

В качестве исследуемого материала использовался композитный материал с полимерной матрицей из полиэфирной смолы, армированный стекловолокном. Оценка качества проводилась по измерению зоны ЗТВ и наличию растрескивания и расслоения в области обработки.

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

Э. Н. ЦОЙ, Л. А. СУЮНОВ

Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан

О ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ В КОЛЬЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ

Изучены условия генерации оптических солитонов в кольцевых резонаторах с керровской нелинейностью. С помощью методов теории динамических систем проведен анализ существования стационарных решений уравнения Луджиато-Лефевра. Найдены профили и параметры стационарных солитонов.

E. N. TSOY, L. A. SUYUNOV

Physical-Technical Institute of Uzbek Acad. Sci., Tashkent, Uzbekistan

ON A POSSIBILITY OF PULSE GENERATION IN RING OPTICAL CAVITIES

Conditions for generation of optical solitons in ring cavities with Kerr nonlinearity are analyzed. By means of methods of the theory of dynamical system, an existence of stationary solutions of the Lugiato-Lefever equation is analyzed. Profiles and parameters of stationary solitons are found.

Кольцевой резонатор состоит из замкнутого волновода, туннельно-связанного в некоторой части с линейным волноводом. Такие резонаторы можно реализовать, используя, например, направленный ответвитель, у которого концы одного из световодов соединены между собой в кольцо. Кольцевые резонаторы представляют большой интерес для различных приложений фотоники [1].

Свет, распространяющийся в линейном волноводе, частично туннелирует в кольцевой волновод и обеспечивает накачку волны в кольцевом волноводе. Динамика света в кольцевом волноводе описывается уравнением Луджиато-Лефевра [1, 2]:

$$iu_z + \frac{\beta}{2}u_{tt} + \gamma|u|^2u = (\delta - i\alpha)u + iS, \quad (1)$$

где u – огибающая электрического поля, z – координата вдоль волокна, t – бегущее время, $\beta, \gamma > 0$, $\delta > 0$, α характеризуют дисперсию, нелинейность, фазовый сдвиг и затухание, соответственно, а $S = |S| \exp(i\theta)$ – внешняя накачка. Численные исследования и эксперименты показывают, что даже если накачка не зависит от времени, в системы могут генерироваться импульсы – диссипативные солитоны. В данной работе изучаются условия генерации устойчивых импульсов, а также определяются параметры этих импульсов.

Ищем решение уравнения (1) в виде $u(t) = a(t) \exp(i\varphi(t))$, где вещественные $a(t)$ и $\varphi(t)$ определяют профиль и фазу волны. Тогда:

$$\begin{aligned} a_{tt} &= a \phi_t^2 + \frac{2}{\beta} (-\gamma a^3 + \delta a + |S| \sin \phi), \\ \phi_{tt} &= -\frac{2a_t \phi_t}{a} + \frac{2}{\beta a} (-\alpha a + |S| \cos \phi), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\phi = \varphi(t) - \theta$. Система (2) имеет состояния равновесия (a_s, ϕ_s) , соответствующие плоским волнам. Амплитуда и фаза этих волн определяется из следующих условий $|S|^2 = a_s^2 [\alpha^2 + (\gamma a_s^2 - \delta)^2]$, $\tan(\phi_s) = (\gamma a_s^2 - \delta) / \alpha$. Анализ этих соотношений показывает, что при заданном $|S|$ и $\delta^2 < 3\alpha^2$ может существовать только одна волна. При $\delta^2 > 3\alpha^2$ могут существовать либо три волны с разными амплитудами, либо одна волна.

Распределению поля в виде стационарных импульсов соответствует гомоклиническая сепаратриса [3], а последовательности импульсов – предельный цикл системы (2). Таким образом, задача сводится к поиску инвариантных траекторий системы (2). В работе проведен анализ типов состояний равновесия, найдены параметры системы, при которых существуют предельные циклы и сепаратрисы. Отметим, что для наблюдения соответствующих импульсов необходима их устойчивость при эволюции вдоль z .

Таким образом, в работе найдены параметры кольцевого резонатора и накачки, при которых происходит генерация импульсов. Рассчитаны профили и параметры этих импульсов. Результаты теории и устойчивость импульсов проверены с помощью численного моделирования исходного уравнения (1).

Список литературы

1. Nonlinear Optical Cavity Dynamics: From Microresonators to Fiber Lasers, Grelu P. (Ed.), (Wiley-VCH, 2016).
2. Lugiato, L. A. et al, Phil. Trans. Royal Soc. A, 2018, V.376, 0113.
3. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. (РХД, 2000).

А. В. ПЛАТОНОВ, В. Н. ПЕТРОВСКИЙ, О.М. ОРЕШКИН
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ СТРУКТУРИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕПЛАВЛЕНИЯ

Исследовано влияние температурного расширения на положение периодических структур на поверхности образцов из сплава ВТ6 при их создании методом лазерного переплава. Показано влияние теплового расширения на качество обработки при лазерных процессах. Сопоставлены теоретические оценки и экспериментальные результаты.

A. V. PLATONOV, V.N. PETROVSKIY, O.M. ORESHKIN
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

INVESTIGATION OF THERMAL EXPANSION INFLUENCE ACCURACY OF THE STRUCTURING BY REMELTING PROCESS

The influence of temperature expansion on the creation of periodic surface structures of the Ti6-Al-4V alloy by laser remelting has been studied. A significant influence of thermal expansion on the quality of processing in laser processes has been shown. Theoretical estimation and experimental results has been conducted.

В процессе обработки непрерывным лазерным излучением, значительная часть энергии переходит в тепловую. Таким образом, процессы лазерной обработки сопровождаются неоднородным температурным распределением внутри образца, а следовательно, и неоднородным тепловым расширением.

Исследование влияние теплового расширения на положение структур, созданных методом структурирования переплавлением (WaveShape) [1, 2] проводилось на плоских образцах из сплава ВТ6 диаметром 60 мм и толщиной 10 мм.

Для оценки влияния температурного расширения, обработка проводилась на образце комнатной температуры и на этом же образце после контролируемого нагрева лазерным излучением до температуры 400 °С.

Эксперименты проводились на роботизированной установке АВВ IRB 4600, оснащенной лазером ЛС-2 производства фирмы «НТО «ИРЭ-Полнос». Обработка производилась в среде инертного газа – аргона. Содержание кислорода контролировалось на уровне ниже 0,01%.

Для двух структур, созданных на образце сплава ВТ6 комнатной температуры и на том же образце, предварительно нагретом до температуры 400 °С, смещение структур относительно друг друга составляет 242,5 мкм (рис. 1).

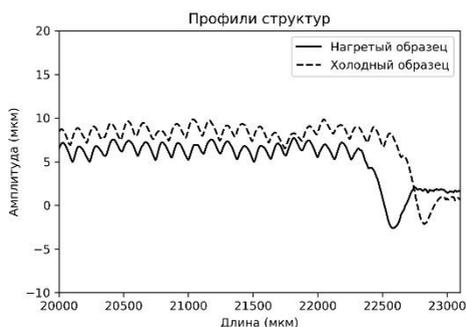


Рис. 1. Профили структур, созданных на образце комнатной температуры (пунктирная линия) и на том же образце, предварительно нагретом до температуры 400 °С.

Показано, что положение структуры на нагретом образце отличается от заданного положения, соответствующего структуре, полученной на холодном образце. При известных термофизических характеристиках, можно рассчитать, какая структура образуется после нагревания. Такой расчет применим для корректировки сигнала модуляции лазерного излучения в процессе структурирования для повышения точности обработки.

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

Список литературы

1. Temmler, A.; Comiotto, M.; Ross, I.; Kuepper, M.; Liu, D. M.; Poprawe, R. (2019): Surface structuring by laser remelting of 1.2379 (D2) for cold Forging tools in automotive applications. In Journal of Laser Applications 31 (2), p.22017. DOI: 10.2351/1.5070077.
2. Temmler, A., Liu, D., Drinck, S., Luo, J., & Poprawe, R. (2019). Experimental investigation on a new hybrid laser process for surface Structuring by vapor pressure on Ti6Al4V. Journal of Materials Processing Technology, 116450. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.116450

А.А. ГАРМАТИНА¹, А.Г. ШУБНЫЙ², А.Д. НУЖДИН²,
В.Е. АСАДЧИКОВ², А.И. БАРАНОВ³, Д.В. МЯСНИКОВ³,
Н.В. МИНАЕВ², В.М. ГОРДИЕНКО^{2,4}

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия;

²ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия;

³НТО ИРЭ-Полюс, г. Фрязино, Московская область, Россия;

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

ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С МИШЕНЬЮ В ВОЗДУХЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Рассмотрено использование излучения фемтосекундного волоконного лазера, взаимодействующего с мишенью в воздушной среде в качестве источника рентгеновского излучения. Предложена перспективная схема для создания источника спектрально яркого рентгеновского излучения с числом фотонов более 10^6 фот/с в телесный угол для решения задач рентгеновской микроскопии.

A.A. GARMATINA¹, A.G. SHUBNYI², V.E. ASADCHIKOV²,
A.D. NUZDIN², A.I. BARANOV³, D.V. MYASNIKOV³,
N.V. MINAEV², V.M. GORDIENKO^{2,4}

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia;

²FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia;

³NTO IRE-Polus, Fryazino, Moscow region, Russia;

⁴Moscow State University M.V. Lomonosov, Faculty of Physics, Moscow, Russia;

GENERATION OF X-RAY UNDER INTERACTION OF FEMTOSECOND FIBER LASER WITH A TARGET IN AIR AND PROSPECTS OF LASER-PLASMA X-RAY MICROSCOPY

The possible use of radiation from a femtosecond fiber laser interacting with a target in air as an X-ray source is considered. A promising scheme is proposed for creating a source of spectrally bright X-ray radiation with a number of photons more than 10^6 phot / s per solid angle for solving problems of X-ray microscopy.

В настоящее время фемтосекундные волоконные лазеры высокой средней мощности используются в ряде научно-технологических

применений, связанных с лазерно-плазменной обработкой материалов. Пучки таких лазеров, остросфокусированные на поверхность мишени, могут генерировать микроплазму, служащую источником рентгеновского излучения (РИ). При достижении лазерной интенсивности порядка 10^{14} Вт/см² фотоны РИ находятся в области энергий в несколько кэВ. Поток рентгеновских фотонов можно управлять с помощью волоконных фемтосекундных лазеров, имеющих при относительно низкой энергии импульса (~10 мкДж) высокую частоту следования импульсов (100 кГц и более). Это значит, что даже при проведении экспериментов в нормальных условиях (вне вакуума) реально получение числа рентгеновских фотонов не менее, чем 10^5 фот/с. Рентгеновское излучение может служить в качестве инструмента для визуализации в физике наночастиц, медицине, химических или биологических исследованиях. Обычно для этих целей в лабораторных экспериментах используются рентгеновские микрофокусные источники. Проблема с микрофокусными трубками заключается в ограниченном потоке рентгеновского излучения (в пределах 10^6 фот/с) и размере источника. Оба этих ограничения обусловлены высоким тепловыми нагрузками, приходящими на весьма малую площадь анода микрофокусной рентгеновской трубки. Именно это обстоятельство обуславливает сравнительно небольшой срок службы таких изделий. Существенной также является и проблема контраста ХРИ относительно тормозного рентгеновского излучения (ТРИ).

Предметом настоящей работы является изложение первых результатов экспериментальных исследований, целью которых является демонстрация возможности создания микроплазменного источника ХРИ кэВ-ного уровня с управляющим устройством на основе импульсно-периодического фемтосекундного волоконного лазера. В экспериментах использовался фемтосекундный иттербиевый волоконный лазер YLPF-10-400-20-R (НТО ИРЭ-Полус) с центральной длиной волны 1030 нм, частота следования импульсов – 100 кГц, энергия в импульсе до 20 мкДж, длительность импульсов – 400 фс, качество излучения $M2 = 1.5$ (рис1). Излучение фокусировалось объективом $f=2$ см на мишень. В итоге выполненных исследований нами получены следующие результаты. Наблюдалась локальная ионизация в области фокуса и получена микроплазма в воздухе, что является тестом на величину пороговой интенсивности (интенсивность выше 10^{13} Вт/см²). Продемонстрирована микрообработка поверхности твердотельной мишени, осуществляемая в режиме абляции и поддерживаемая приповерхностным плазмообразованием. Установлено, что абляция металлических мишеней сопровождается

генерацией рентгеновского излучения, причем сигнал рентгеновского излучения РИ регистрировался преимущественно из микрократера мишени, в котором происходило возрастание лазерной интенсивности. Зарегистрировано характеристическое рентгеновское излучение (ХРИ) при воздействии на поверхность твердотельной мишени (Cu, Fe, Ti, Ag) острогофокусированного лазерного пучка при средней мощности около 5Вт и достигнут выход ХРИ на уровне 10^5 фот/сек в телесный угол (К-линия титана 4.5 кэВ и L-линия серебра 2.8 кэВ) с контрастом более 10 относительно тормозного фона (рис.2). Зарегистрирован сигнал второй гармоники фемтосекундного лазера, возникающий на градиенте электронной плотности в приповерхностной микроплазме воздуха.

Таким образом, нами получены пионерские результаты, которые свидетельствуют о том, что в результате последующей оптимизации экспериментальных условий (увеличение мощности до 20 Вт и частоты генерации лазера до 1 МГц, а также оптимизации условий фокусировки и поверхностной микроструктуры мишени) будет создан источник спектрально яркого рентгеновского излучения с числом фотонов более 10^6 фот/с в телесный угол, пригодный для решения задач рентгеновской микроскопии.



Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки

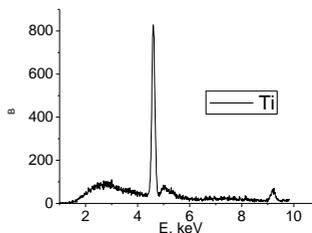


Рис.2. Выход рентгеновского излучения из микроплазмы титана

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, гранта РФФИ №18-29-20090.

**Секция
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И
УПРАВЛЯЕМЫЙ
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ**

Руководитель секции – к.ф.-м.н., доцент
кафедры № 21 Гаспарян
Ю.М.
Секретарь секции – инженер кафедры № 21
А.Б. Ляшенко

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9321

E-mail: YMGasparyan@mephi.ru, ABLyashenko@mephi.ru

А.И. АЛИЕВА, С.А. КРАТ, С.А. ГАНИН, Н.Е. ЕФИМОВ,
А.С. ПРИШВИЦЫН, Г.М. ВОРОБЬЁВ, В.А. КУРНАЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

СИСТЕМА СВЧ – ПРЕДЫОНИЗАЦИИ МАЛОГО СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА МИФИСТ

Разработанная система сверхвысокочастотной предыонизации плазмы для малого сферического токамака МИФИСТ была апробирована в серии опытов. В работе представлены результаты экспериментов по взаимодействию сверхвысокочастотных волн в диапазоне частот электронно-циклотронного резонанса с газом на стадии пробоя. Система позволила получить предплазменный разряд длительностью до 20 мс на заданном расстоянии от внутренней стенки вакуумной камеры токамака.

A.I. ALIEVA, S.A. KRAT, S.A. GANIN, N.E. EFIMOV, A.S.
PRISHVITSYN, G.M. VOROBYOV, V.A. KURNAEV
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

MICROWAVE PREIONIZATION SYSTEM OF SMALL SPHERICAL TOKAMAK MEFHIST

The developed microwave preionization system of small spherical tokamak MEFHIST has been tested in a series of experiments. The study presents obtained results of the interaction of electron-cyclotron resonance microwaves with gas at the breakdown. The system allowed to obtain pre-plasma with an up to 20 ms duration at a given distance from an inner wall of the tokamak vacuum vessel.

В рамках учебно-демонстрационных и исследовательских целей в институте ЛаПлаз НИЯУ МИФИ был создан малый сферический токамак МИФИСТ. К основным параметрам установки относятся большой радиус $R=25$ см; малый радиус $a = 13$ см; аспектное отношение $A = R/a = 1.9$; вытянутость камеры $k \sim 2$; тороидальное поле на оси $B_0 \sim 0.5$ Тл; длительность разряда $t \sim 10 - 30$ мс [1, 2]. На данный момент ведутся работы по отладке его работы.

К одному из первых этапов экспериментальной программы можно отнести улучшение параметров начальной стадии разряда в токамаке. Удобно применять метод создания предварительной плазмы – предыонизацию. Использование систем предыонизации позволяет

снизить напряжение пробоя и сэкономить запас вольт-секунд полоидальной системы, что для малых сферических токамаков в связи с их ограниченными размерами является определяющим фактором. Система сверхвысокочастотной (далее СВЧ) предьонизации должна обеспечивать ионизацию и надёжный пробой используемого газа в заданной области вакуумной камеры токамака. Использование подобной системы позволяет генерировать тонкий цилиндрический плазменный слой, что приводит к развитию тока на определенном радиусе, соответствующему электронно-циклотронному резонансу.

С целью достижения лучших параметров пробоя газа для токамака МИФИСТ была сконструирована система ввода СВЧ энергии, позволяющая добиться эффекта предьонизации. В качестве источника СВЧ мощности могут использоваться различные приборы – магнетроны, клистроны, гиротроны. В рассматриваемом случае использовался магнетрон, рабочая частота которого составляет 2,45 ГГц.

В работе представлены результаты улучшения разработанной системы предьонизации. Использовались и сравнивались две различные схемы питания магнетрона, первая из которых обеспечивает работу системы в импульсном режиме, вторая – в непрерывном. Таким образом, в качестве питания магнетрона использовалась как и стандартная схема удвоения, так и модифицированная для достижения коэффициента заполнения импульса $K = 1$, что приводит к ряду преимуществ. Также были проведены эксперименты по пробоям газа с использованием созданных СВЧ - блоков. Показаны избранные параметры инициированных предплазменных разрядов, проанализированы их характеристики и предложены меры по дальнейшему улучшению параметров пробоя рабочего газа.

Работа выполнена при поддержке корпорации РОСАТОМ в лице АО «Наука и инновации».

Список литературы

1. Курнаев В. А. и др. СТАТУС РАЗРАБОТКИ ТОКАМАКА МИФИСТ //Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2019. – Т. 8. – №. 6. – С. 491-497.
2. Курнаев В. А. и др. ПРОЕКТ ТОКАМАКА МИФИСТ //Ядерная физика и инжиниринг. – 2019. – Т. 10. – № 1. – С. 24 – 27.

А.С. АСЕЕВ^{1,2}, В.И. ЗАЙЦЕВ², И.А. БАРЫКОВ³
¹АО ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк
²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В исследованиях инерциального синтеза, где при сжатии термоядерных мишеней характерные времена процессов составляют 10^{-8} – 10^{-9} с, а импульсная мощность возникающего излучения плазмы достигает 10^{13} – 10^{14} Вт. Применение фильтров, ослабляющих интенсивность потока излучения, искажает спектральный состав потока. Описывается детектор рентгеновского излучения, в котором в качестве чувствительного элемента используется диэлектрик – оптическое стекло КУ1 (рис. 1). Работа детектора базируется на обнаруженном авторами эффекте возникновения электрического поля в диэлектрике под действием радиации. Измерения проводились на установке “Ангара-5-1”, где источником излучения служит плазма мегаамперного Z-пинча. Показано, что при падающей на детектор мощности излучения ~ 1 МВт/см² отклик детектора составляет несколько вольт при разрешении во времени ~ 1 – 2 нс (рис. 2) Измерения показали, что такая нагрузка обеспечивает Z-пинч, являющийся на конечном этапе сжатия импульсным источником излучения с параметрами: длительность на полувысоте 10 нс, пиковая мощность в месте расположения детекторов 1–5 МВт/см², спектральный состав излучения находится в диапазоне энергий квантов 25–1000 эВ.

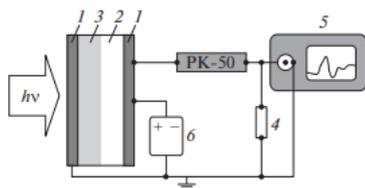


Рис. 1. Измерительная схема. 1 – контактное Al-покрытие (толщина 30 нм); 2 – диэлектрик (толщина 0,5 мм); 3 – область поглощения излучения в диэлектрике; 4 – согласующее сопротивление 50 Ом; 5 – осциллограф TDS 2024; 6 – источник питания.

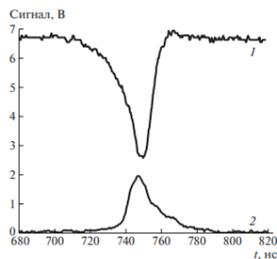


Рис. 2. Сигналы различных детекторов излучения (мощность ~ 2 МВт/см²): 1 – диэлектрический датчик (стекло КУ1); 2 – вторично-эмиссионный датчик.

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, Н.С. ПУНТАКОВ, А.М. ЗАХАРОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАСПЫЛЕНИЕ И МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ «АКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ»

Рассмотрены процессы, сопровождающие взаимодействие ионов и плазмы с материалами при температурах, соответствующих активации диффузионных процессах. Показано, что основными факторами, определяющими особенности процессов распыления и модификации материалов в процессе ионно-плазменного облучения при температурах «активной диффузии» являются диффузия внедрённых частиц и радиационных вакансий и напряжения, возникающие в приповерхностных слоях.

L.B. BEGRAMBEKOV, N.S. PUNTAKOV, A.M.ZAKHAROV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

SPUTTERING AND MODIFICATION OF MATERIALS IN THE PROCESS OF ION-PLASMA IRRADIATION AT TEMPERATURES OF "ACTIVE DIFFUSION"

The processes accompanying the interaction of ions and plasma with materials at temperatures corresponding to the activation of diffusion processes are considered. It is shown that the main factors determining the features of the processes of sputtering and modification of materials in the process of ion-plasma irradiation at temperatures of "active diffusion" are the diffusion of embedded particles and radiation vacancies and stresses arising in the near-surface layers.

Процессы, сопровождающие взаимодействие ионов и плазмы с материалами при температурах, соответствующих активации диффузионных процессах, в той или иной степени рассматривались в большом количестве работ (результаты некоторых из таких работ используются в данном докладе). Выявлены особенности распыления материалов при этих условиях, и сообщается о разнообразных изменениях в приповерхностных слоях в зависимости от условий и параметров ионного облучения.

В данной работе предпринята попытка систематизировать особенности распыления и процессы, возбуждаемые в приповерхностных

слоях материалов при температурах активных диффузионных процессов в зависимости от типа и энергии ионов, состава, структуры и агрегатного состояния облучаемых материалов.

В качестве объектов исследования выбраны твёрдый и жидкий металлы, металлический сплав, двухкомпонентный диэлектрик, металл с напылённым металлическим слоем, монокристаллический и анизотропный графиты. Рассмотрены особенности их распыления и модификации в специфических условиях облучения.

Показано, что при облучении вольфрама интенсивными потоками ионов водородной плазмы с энергией, недостаточной для смещения атомов вольфрама, развиваются процессы – рост блистеров, увеличение пластичности и т.п., свидетельствующие об уменьшении температуры плавления приповерхностного слоя в процессе облучения.

Облучение потоками ионов водорода и гелия умеренной плотности с энергиями, достаточными для создания вакансий, в металлов и диэлектриков также приводит к трансформации структуры, возникают напряжения, приводящие к развитию явлений блистеринга и флекинга.

Интенсивное облучения металлов - вольфрама, молибдена - ионами гелия с энергиями, достаточными для образования вакансий, в условиях активизации диффузии внедрённых частиц при повышенных температурах, наблюдается развитие структуры «поверхностного пуха».

В случае облучение металлов ионами с энергиями, достаточными для смещения поверхностных атомов, и при наличии условий, препятствующих скольжению дислокаций в приповерхностных слоях, развиваются напряжения, и над облучаемой поверхностью растут кристаллы (вискеры).

При облучение металлов ионами, с энергиями, достаточными для распыления поверхности, и при наличии условий, препятствующих скольжению дислокаций, над облучаемой поверхностью формируются конические образования.

В жидком металле образуются блистеры макроскопических размеров, свидетельствуя о распространении внедрённых атомов гелия, практически во всю глубину расплава.

Облучение изотропного графита интенсивными ионными потоками сопровождается распространением радиационных вакансий на макроскопическую глубину и формированием пористого слоя в приповерхностной области.

Облучение графитовых структур, с графеновыми слоями перпендикулярными облучаемой поверхности, приводит к их аморфизации и образованию пиролитической структуры (Структуры с графеновыми слоями кристаллических зёрен параллельными облучаемой поверхности), при рекристаллизации.

Радиационные вакансии, формирующиеся в пиролитическом графите при облучении ионами не диффундируют в глубину. В приповерхностных слоях формируются сжимающие напряжения, приводящие к их отслаиванию и сворачиванию. При сворачивании на углы, близкие к 90 градусам, происходит интенсивное разрушение структуры слоёв ионным облучением и развитие кристаллов с графеновыми слоями перпендикулярными облучению.

При облучению пиролитического нитрида бора преимущественно распыляются атомы азота. Образующиеся вакансии диффундируют вдоль кристаллических плоскостей к границам кристаллических зёрен. В условиях повышенных температур следствием этого является исчезновение структуры нитрида бора и испарение атомов бора из граничных областей кристаллитов.

Проведённое выше рассмотрение показывает, что диффузия внедрённых частиц и радиационных вакансий и возникающие в приповерхностных слоях напряжения являются основными факторами, определяющими особенности процессов распыления и модификации материалов в процессе ионно-плазменного облучения при температурах «активной диффузии».

О.С. БЕЛОЗЕРОВ, С.А. ХРОМОВ, С.А. ДАНЬКО

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

ДВА МЕХАНИЗМА УСКОРЕНИЯ ИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ГЕНЕРАТОРЕ РЭП «КАТРАН»

В данной работе приведены результаты экспериментов на генераторе «Катран» ($I \approx 120$ кА, $U_0 \approx 250$ кВ, $t \approx 80$ нс), где анодом служит тонкая фольга, выявлены две области, в которых происходит ускорение ионов в одном и том же направлении. Одно ускорение происходит от катода к аноду в высоковольтном диоде, а другое – за анодной фольгой в сторону виртуального катода. Эти процессы ассоциируются с разными механизмами ускорения ионов.

O.S. BELOZEROV, S.A. CHROMOV, S.A. DAN'KO

National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

TWO MECHANISMS OF ION ACCELERATION IN THE EXPERIMENT ON THE GENERATOR REP «KATRAN»

This paper presents the results of experiments on the Katran generator ($I \approx 120$ kA, $U_0 \approx 250$ kV, $t \approx 80$ ns), where a thin foil serves as the anode. Two regions in which acceleration occurs in the same direction are identified. One acceleration occurs in the high voltage diode from the cathode to the anode, and the other - behind the anode foil towards the virtual cathode. These processes are associated with different acceleration mechanisms.

Начиная с 60-х годов выходят работы по ускорению ионов электронным пучком, результаты которых неоднократно воспроизводились и подтверждались. Тем не менее, несмотря на длительное время, прошедшее с тех пор, до сих пор нет исчерпывающей теоретической модели ускорения ионов в электронном пучке инжектируемым в вакуумную камеру.

В рамках исследований по ускорению ионов были проведены эксперименты на генераторе «Катран» ($I \approx 120$ кА, $U_0 \approx 250$ кВ, $t \approx 80$ нс). Для исследования механизма ускорения ионных пучков мегаэлектрон-вольтовых энергий использовались методы диагностики, описанные в работах [1, 2].

На рис. 1 представлена схема эксперимента, который проводился при зазоре между катодом и анодом в высоковольтном диоде равном ~ 7.5 мм. В качестве анода стояла алюминиевая фольга толщиной 10 мкм, за которой размещался латунный коллиматор с цилиндрическими

отверстиями. Коллиматор предназначен для того, чтобы либо устранить образование виртуального катода за фольгой, либо ограничить дистанцию, на которой виртуальный катод мог ускорять ионы.

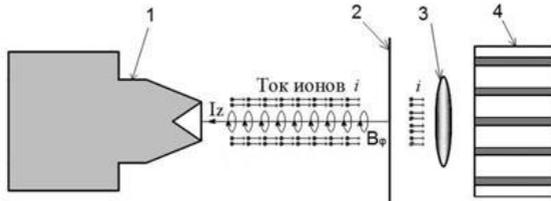


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – катод; 2 – анодная фольга; 3 – виртуальный катод; 4 – коллиматор

Проведённые эксперименты показали, что ускорение ионов происходит в двух местах: внутри высоковольтного диода генератора и снаружи за тонкой анодной фольгой. Ускорение ионов внутри высоковольтного диода связано с колебаниями электрического тока в высоковольтном диоде с периодом $T \approx 2$ нс. Это свидетельствует в пользу одной из моделей, например [3], ускорения ионов, связанных с развитием перетяжки в плазме между катодом и анодом. Оценка сверху характерного напряжения при перетяжке проводящего канала с предположением полного вытеснения плазмы и обрыва тока оказалась равной $U = 6$ МВ. Возникающего электрического поля достаточно, чтобы за полупериод колебания тока достичь энергий 850 кэВ/нуклон, наблюдаемых в эксперименте.

Ускорение ионов в заанодной области связано с другим механизмом, в котором ускорение обуславливается движением виртуального катода, поскольку при удалении коллиматора от анодной фольги на 3 см энергия ионных сгустков возрастала до 2,5 МэВ/нуклон. Оценим удаление p виртуального катода от анода предполагая, что слой заряда виртуального катода доводит значение потенциала $U_{\text{вк}}$ до значения, равного напряжению в высоковольтном диоде генератора. По измеренной на аноде плотности тока РЭП и напряжению на генераторе получим $U_{\text{вк}} = \int E dp = 188i[A/m^2]p^2[m]$ и $p \approx 0,36$ см. Энергия, набираемая ионами, в 10 раз больше U_0 . Получается, что вследствие движения виртуального катода ионы 10 раз ускоряются в виртуальном диоде, имеющим эффективный зазор $p_3 \approx 0,3$ см. Сделанные оценки p

близки друг к другу, что говорит в пользу модели ускорения ионов движущимся виртуальным катодом [4].

Список литературы

1. Белозеров О. С., Данько С. А., Ананьев С. С. // ВАНТ Серия «Термоядерный синтез». 2020 Т. 43 Вып. 2 С. 80-86. DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-80-86.
2. Белозеров О. С., Бакшаев Ю. Л., Данько С. А. // ВАНТ Серия «Термоядерный синтез». 2018 Т. 41 Вып. 4 С. 99-105. DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-99-105.
3. Putnam S.D. // Phys. Rev. Lett. 1970. Vol. 25, № 16, P. 1129–1132.
4. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1983, т. 14, вып. 1, стр. 181–226.

В.В. КРАВЧЕНКО, Д.П. КНЯЖЕВ, Д.Д. БЕРНТ, А.А.
ПИСАРЕВ*

АО «Октогласс», Москва, Россия

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

ВЛИЯНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА W-СЛОЕВ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ МОДУЛЕЙ

Рассмотрены процессы деградации тонкопленочных электрохромных модулей в ходе их циклирования, связанные с блистерообразованием в PVD-осаждаемых оксидных слоях вольфрамовых электродов. Показано, что блистерообразование связано с накоплением в вольфрамовых пленках радикальных компонент из нижележащих слоев тонкопленочной структуры модулей. Проведена по средствам термодесорбционной спектроскопии оценка проницаемости керамических вольфрам-оксидных слоев в зависимости от их стехиометрии и предложены пути улучшения циклической устойчивости вольфрамовых слоев через их реакционное осаждение из плазмы магнетронного разряда в условиях дефицита реакционной компоненты смеси рабочих газов.

V.V. KRAVCHENKO, D.P. KNYAZHEV, D.D. BERNT,
A.A. PISAREV*

“Octoglass” JSC, Moscow, Russia

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

MAGNETRON PLASMA SPUTTER DEPOSITED W- LAYERS' PERMEABILITY INFLUENCE ON THE CYCLING STABILITY OF THIN FILM ELECTROCHROMIC MODULES

The processes of thin film electrochromic modules degradation during their cycling through the formation of blisters within the PVD sputtered tungsten oxide electrode layers are considered. The formation of blisters is shown to be caused by the retention of radical components transported into the tungsten films from the underneath layers of the module's layerstack. Permeability of the ceramic tungsten-oxide layers of varying stoichiometry is studied by the means of thermodesorption spectroscopy and the ways for increasing the cycling sustainability of tungsten layers through their reactive magnetron PVD in deficiency of reactive component of working gas mixture are proposed.

Электрохромные модули (ЭХМ) – устройства, изменяющие интегральную интенсивность пропускания электромагнитного излучения определенного диапазона длин волн под действием прикладываемого напряжения. Распространенной конструкцией ЭХМ является многослойная тонкопленочная система, переключение состояния которой происходит за счет интеркаляции носителей заряда между двумя электродными слоями через электролит, а часто применяемым электрохромным электродом-акцептором является слой оксида вольфрама, как правило осаждаемого в стехиометрии WO_3 реакционным распылением металлической мишени в $Ag+O_2$ плазме магнетронного разряда [1].

Зачастую, ЭХМ деградируют при их циклическом переключении между оптическими состояниями с образованием кластеров белесых точечных дефектов в слоевой структуре. Циклирование электрохромной ячейки в среде жидкого электролита позволило локализовать дефекты в W-электроде, а их AFM/SEM/EDS анализ показал, что дефекты представляют собой блистеры с повышенной концентрацией в них компонент подлежащей электроду прозрачной токопроводящей керамики (TCO-слоев на стеклянной подложке и вспомогательных им тонких барьерных диэлектриков) – прежде всего Sn, Al и N, а также, в меньшей степени, Na и Mg из подложки.

Термодесорбционная спектроскопия части электрохромной структуры вплоть до W слоя включительно, осажденной поверх подложки из монокристаллического кремния, продемонстрировала в целом худшую проницаемость стехиометрических WO_3 пленок по сравнению с оксидом вольфрама, осажденном в субстехиометрическом состоянии при дефиците реакционной компоненты смеси рабочих газов в ходе PVD. Было предположено, что худшая диффузионная проницаемость WO_3 пленок приводит к накоплению под ними радикальных компонент подлежащих слоев, транспорт которых обусловлен термическими и электрохимическими процессами восстановления материалов в ходе эксплуатации ЭХМ. Агрегация накопленного вещества приводит к образованию наблюдаемых блистеров. Осаждение W-O пленки в субстехиометрическом состоянии должно минимизировать эффект накопления радикалов и способствовать лучшей циклической стабильности ЭХМ.

Данное предположение было подтверждено снижением на свыше 95% концентрации точечных дефектов по итогам 50 000 циклов

переключения ЭХМ с W-O электродом, осажденным при в 3 раза сниженном соотношении потоков напуска O_2/Ag , по сравнению с требующимся для работы в режиме полного отравления мишени.

Список литературы

1. Chuan L., Hsieh J.H., Su T.Y., Wu P.L. // Thin Solid Films 2018. Vol. 660, P. 373–79.

К.Ю. ВАГИН, С.А. УРЮПИН

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

**СТОЛКНОВИТЕЛЬНАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СЛАБОИОНИЗОВАННОГО
КОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ ИНЕРТНОГО ГАЗА**

Для плазмы, образованной при многофотонной ионизации инертного газа, в длинноволновой области предсказана возможность существования неустойчивой продольной электронной моды. Появление такой моды связано с особенностями упругого рассеяния фотоэлектронов на нейтральных атомах газа, возникающими вследствие эффекта Рамзауэра-Таунсенда.

K.YU. VAGIN, S.A. URYUPIN

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

**COLLISIONAL POTENTIAL INSTABILITY OF INERT GAS
WEAKLY IONIZED BY SHORT LASER PULSE**

The possibility of the existence of unstable longitudinal electron mode in the long-wavelength region is predicted for plasma formed by multiphoton ionization of inert gas. The appearance of such a mode is associated with the peculiarities of photoelectron elastic scattering of neutral gas atoms arising from the Ramsauer-Townsend effect.

Рассмотрена плазма, образованная при многофотонной ионизации атомов газа коротким импульсом линейно поляризованного лазерного излучения. Образующееся после выключения импульса на временах порядка обратной частоты столкновений электронов с атомами изотропное неравновесное распределение фотоэлектронов по скоростям имеет форму четко выраженного узкого энергетического пика, положение которого определяется кинетической энергией приобретаемой фотоэлектронами в результате ионизации. Степень ионизации формирующегося плазменного образования невелика и фотоэлектроны в основном сталкиваются упруго с нейтральными атомами.

Упругое рассеяние фотоэлектронов на нейтральных атомах имеет особенности, обусловленные эффектом Рамзауэра-Таунсенда, который типичен для инертных газов и заключается в аномальном уменьшении транспортного сечения рассеяния в области характерных для многофотонной ионизации энергий фотоэлектронов порядка 1эВ. С учетом этих особенностей получено общее выражение для продольной диэлектрической проницаемости фотоионизированной плазмы, учитывающее зависимость эффективной частоты столкновений фотоэлектронов от скорости. Наряду с высокочастотным решением

дисперсионного уравнения для продольных мод, отвечающим плазменной волне, найдено новое решение дисперсионного уравнения, отвечающее возможности развития продольной столкновительной неустойчивости с инкрементом, не превышающим половины электронной ленгмюровской частоты. На рис. 1 представлен инкремент такой неустойчивости, соответствующий плазменным

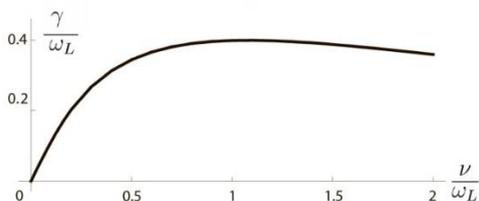


Рис. 1. Зависимость инкремента γ аperiodически неустойчивой моды от частоты столкновений ν фотоэлектронов с атомами Xe (ω_L – ленгмюровская частота)

возмущениям, аperiodически нарастающим во времени в плазме Xe без пространственной дисперсии. Аperiodический характер неустойчивости сохраняет и при конечных волновых числах, меньших отношения электронной ленгмюровской частоты к средней скорости фотоэлектронов. По мере увеличения волнового числа низкочастотная мода трансформируется в продольную неустойчивую волну с быстро увеличивающейся частотой и уменьшающимся инкрементом. В коротковолновой области эта волна сильно затухает из-за столкновений фотоэлектронов. Показано, что влияние разброса фотоэлектронов по энергии на неустойчивую моду сравнительно мало.

Отметим, что в условиях, когда частота столкновений не аномально мала, в наиболее интересной длинноволновой области обычные плазменные волны сильно затухают на временах сравнимых с их периодом, и плазма становится неустойчивой относительно развития низкочастотной длинноволновой потенциальной неустойчивости.

Для типичных параметров рассмотренного объекта инкремент описанной неустойчивости попадает в ТГц диапазон частот.

Список литературы

[Vagin](#) K.Yu., [Uryupin](#) S.A. // Physics of Plasmas v. 27, №11, p.112110-(1-12), 2020.

Е.А. ВИНИЦКИЙ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, А.С. ПРИШВИЦЫН,
Г.М. ВОРОБЬЁВ, В.А. КУРНАЕВ, Н.Е. ЕФИМОВ, С.А. КРАТ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ КАТУШЕК ТОКАМАКА МЕРНІСТ

Спроектирована геометрия катушки тороидального магнитного поля для токамака МЕРНІСТ с учётом ограничений, вносимых геометрией камеры, исходя из задачи минимизации рассеянного поля. Определены значения рассеянных полей, образующихся внутри камеры за счёт наклона тороидальных катушек. Путём моделирования в пакете COMSOL было оценено влияние отклонения геометрии катушек с учётом технических отверстий под фланцы на распределение рассеянных магнитных полей.

Е.А. VINITSKIY, D.G. BULGADATYAN, A.S. PRISHVITSYN,
G.M. VOROBYOV, V.A. KURNAEV, N.E. EFIMOV, S.A. KRAT
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

THE OPTIMIZATION OF THE TOROIDAL COILS GEOMETRY OF THE TOKAMAK MERNIST

The geometry of the toroidal magnetic field coils for the MERNIST tokamak is designed taking into account the limitations introduced by the chamber geometry, based on the problem of minimizing the scattered field. The values of the scattered fields formed inside the chamber due to the inclination of the toroidal coils are determined. By modeling in the COMSOL package, the influence of the deviation of the coil geometry, taking into account the technical holes for the flanges, on the distribution of scattered magnetic fields was estimated.

Для токамака МЕРНІСТ предложена винтовая конфигурация тороидального магнитного поля катушек, в которой один виток плавно переходит в другой[1]. Заявленная конфигурация позволяет уменьшить рассеянные поля токоподводов за счёт уменьшения их количества, упростить электрическую схему по сравнению с применением отдельных тороидальных катушек и обеспечивает согласованную работу каждой части тороидальной системы.

В связи с выбранной конфигурацией, возникает задача в обеспечении компенсации полоидальных рассеянных полей внутри камеры, которые возникают в результате наклона витков тороидальной

обмотки. Одним из возможных методов данной компенсации является оптимизация геометрических параметров винтовой обмотки, а именно распределения угла наклона витков тороидального соленоида в зависимости от их длины. Помимо этого выбор другого геометрического параметра, полоидального сечения витка соленоида, обусловлен минимизацией отрывных сил, действующих на них.

В представленной работе проводилась оптимизация геометрии витков тороидального соленоида токамака МЕРНИСТ. Форма полоидального сечения рассчитывалась, исходя из классического решения для геометрии катушек в условии компенсации сил действующих на неё[2]. Поверхность соленоида при этом считалась идеально проводящей тороидальной поверхностью. Для нахождения распределения угла наклона витков по их длине, вводилась тороидальная компонента тока, пропорциональная углу наклона катушки. Находилось такое распределение тороидального тока по полоидальному сечению, которое не создавало бы внутри образованной поверхности рассеянных полей[3].

На основе данного метода, была определена геометрия винтового тороидального соленоида для токамака МЕРНИСТ. Продемонстрировано распределение рассеянных полей в области разрядной камеры. С помощью пакета моделирования COMSOL оценено влияние отклонение геометрии соленоида от идеально проводящей тороидальной поверхности.

Список литературы

1. А.Н Левицкий, О.В. Федоров, С.В. Цаун, К.Г. Шаховец, П.Н. Юшманов – Разработка тороидального магнитного поля в сферическом токамаке GLOBUS. Препринт ИАЭ-546/7, 1992.
2. Захаров Л.Е. // ЖТФ, 1975, т.45 с.1049
3. Шафранов В.Д. // ЖТФ, 1972, т.42 с.1785

Ю.М. ГАСПАРЯН, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ,
Е.Д. ВОВЧЕНКО, Н.Е. ЕФИМОВ, В.С. ЕФИМОВ, С.А. КРАТ,
М.А. ПОПОВА

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

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПОВЕРХНОСТЬ НАСЫЩЕННЫХ ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены эксперименты, выполненные на установке «Большой масс-монокроматор МИФИ» с целью разработки и апробации лазерных диагностик для дистанционного мониторинга *in-vacuo* поверхности материалов, применяемых в токамаках. Приведены результаты тестирования материалов методами лазерно-индуцированной десорбции и LIBS.

Yu.M. GASPARYAN, D.G. BULGADARYAN,
D.N. SINELNIKOV, E.D. VOVCHENKO, N.E. EFIMOV,
V.S. EFIMOV, S.A. KRAT, M.A. POPOVA

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

ANALYSIS FROM THE EFFECT OF A NANOSECOND LASER PULSE ON THE SURFACE OF MATERIALS SATURATED WITH HYDROGEN ISOTOPES

The experiments carried out on the experimental facility «Large Mass-monochromator MEPhI» for the development and testing of laser diagnostics for remote monitoring *in-vacuo* of the materials surface used in tokamaks are considered. The results of testing materials by laser-induced desorption and LIBS methods are presented.

Для получения информации о насыщении стенки токамака изотопами водорода в последнее время начали активно разрабатываться новые диагностические методики, основанные на дистанционном воздействии лазерным излучением на обращенные к плазме поверхности материалов [1]. Интерес к этим лазерным методикам основан на возможности оперативно контроля за изменениями в приповерхностном слое материалов *in-vacuo* задолго до заключительного *post mortem* анализа.

На кафедре физики плазмы (НИЯУ МИФИ) в рамках таких исследований разрабатываются две диагностики: лазерно-индуцированная десорбция (ЛИД) и лазерная искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС), более известная как LIBS. Их апробация на экспериментальной установке и полученные результаты представлены в данной работе.

Эксперименты выполнены на установке «Большой масс-монохроматор МИФИ», предназначенной для исследования взаимодействия ионов с поверхностью и дополнительно оснащенной YAG: Nd³⁺ лазером ($\lambda = 1,064$ мкм) с энергией в импульсе до 70 мДж и длительностью импульса ≤ 20 нс (рис. 1).

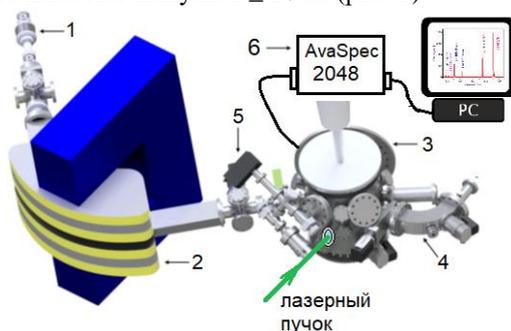


Рис.1
 1— источник ионов
 2— электромагнит
 3— камера взаимодействия
 4— энергоанализатор
 5— квадрупольный масс-спектрометр QMS
 6— спектрометр AvaSpec 2048

Излучение лазера вводилось в камеру через кварцевое окно и фокусировалось на образец в центре камеры линзой ($f = 75$ мм). Оптические спектры регистрировались спектрометром AvaSpec 2048, а отдельные линии монохроматором МУМ. Передача оптического сигнала из вакуумной камеры на входные щели спектральных приборов выполнена с помощью оптического волокна. Для оценки количества десорбированного газа использовался квадрупольный масс-спектрометр.

Исследовались насыщенные дейтерием пленки титана и вольфрама. Методом ЛИД для дейтерия регистрировались сигналы третьей (HD) и четвертой (D₂) атомных масс при различной плотности мощности излучения. Наибольший выход дейтерия наблюдался для плёнки титана. С помощью электронного микроскопа исследовалась поверхность образцов до и после облучения и определялся размер пятна

фокусировки для оценки плотности мощности на образце. Методом ЛИЭС определялся элементный состав приповерхностного слоя образца и оценивалось время интенсивного излучения спектральных линий лазерной плазмы.

Список литературы

1. V. Philipps, A. Malaquias, Zlobinski et al. Development of laser-based techniques for in situ characterization of the first wall in ITER and future fusion devices, Nucl. Fusion. **53** (2013), doi:10.1088/0029-5515/53/9/093002.

Р.О. ГАВРИЛИН*, А.О. ХУРЧИЕВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, С.А. ВЫСОЦКИЙ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ, И.В. РУДСКОЙ, А.А. ГОЛУБЕВ, В.А. ВОЛКОВ, А.А. ДРОЗДОВСКИЙ, Р.П. КУЙБЕДА, П.А. ФЕДИН, С.М. САВИН, А.П. КУЗНЕЦОВ
ФГБУ "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Москва, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ПОТЕРЬ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА С ЭНЕРГИЕЙ 100 кэВ/а.е.м. В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ.

Изучение процессов торможения тяжелых заряженных частиц в плазме относится к фундаментальным проблемам физики плазмы и физики высокой плотности энергии в веществе. В представленном исследовании впервые получены экспериментальные данные по взаимодействию тяжелых ионов Fe⁺² с энергией 100 кэВ/а.е.м. с водородной плазмой, выполнена диагностика электронной плотности, температуры и степени ионизации плазмы, определена тормозная способность плазмы и выполнено сравнение с существующими теоретическими моделями торможения ионов.

R.O. GAVRILIN*, A.O. KHURCHIEV, A.V. KANTSYREV,
M.M.BASKO, S.A. VISOTSKIY, D.S. KOLESNIKOV, I.V.
ROUDSKOY, A.A. GOLUBEV, V.A.VOLKOV, A.A.
DROZDOVSKY, R.P. KUIBEDA, P.A. FEDIN, S.M. SAVIN, A.P.
KYZNETSOV

Institute for Theoretical and Experimental Physics named by A.I. Alikhanov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

STOPPING POWER MEASUREMENT FOR 100 keV/u Fe IONS IN HYDROGEN PLASMA

Interaction of heavy ion beam with matter is fundamental problem of the plasma physic and high energy density in matter physic. In the report presents the first obtained results of experimental studies of Fe⁺² ions with an energy of 100 keV/u energy losses in a hydrogen plasma. Plasma density, temperature and ionization degree measurements produced. Obtained ion stopping data compared with theoretical models.

Для генерации водородной плазмы была разработана электроразрядная мишень [1]. Плазма создается сильноточным электрическим разрядом в двух коллинеарных кварцевых трубках с внутренним диаметром 5 мм и длиной 78 мм, заполненных водородом. Водород подается в центральную часть мишени через игольчатый клапан и откачивается через диафрагмы, расположенные на оси

мишени. Рабочее давление газа в мишени составляет от 1 до 4.5 торр. Конденсаторная батарея емкостью 3.8 мкФ заряжается до напряжения 1.5 – 6 кВ и создает ток до 5 кА в каждом разрядном канале мишени. Симметричность разряда в двух каналах достигается с помощью специальных катушек индуктивности, включенных в разрядную цепь. Два канала мишени с противоположным направлением тока позволяет избежать эффекта дефокусировки, проходящего через мишень, ионного пучка.

Проведена диагностика параметров плазмы сильноточной газоразрядной мишени методом двухволновой лазерной интерферометрии и методом спектроскопии с временным разрешением. Измерения показали изменение линейной электронной плотности в диапазоне $2.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ до $1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при изменении начального давления водорода в диапазоне 1 – 4.5 торр и напряжения на конденсаторной батарее от 1.5 до 5 кВ [2]. Максимальная степень ионизации плазмы составила 0.82 ± 0.08 и была достигнута при начальном давлении водорода составляет 1 торр и напряжении 5 кВ. Погрешность проведенных измерений не превышает 10%. Температура водородной плазмы находится в диапазоне 1.01 – 1.06 эВ и мало зависит начальных параметров разряда.

На линейном ускорителе ТИПр в ИТЭФ проведены измерения тормозных потерь тяжелых ионов Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м в водородной плазме газоразрядной сильноточной мишени [3]. Для ионов железа с начально полной энергией 5.6 МэВ потери энергии в плазме газоразрядной мишени составили от 0.4 до 1.15 МэВ. На основании полученных экспериментальных данных о потерях энергии в плазме и параметрах плазмы при тех же начальных условиях определена тормозная способность плазмы. Получено среднее значение тормозной способности свободных электронов плазмы для ионов железа Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м.:

$$S_{fe} = (860 \pm 130) \text{ МэВ}/(\text{мг}/\text{см}^2)$$

На рис. 1 показано измеренное значение S_{fe} и представлено сравнение с тремя теоретическими кривыми для зависимости тормозной способности от энергии ионов железа. Кривая 2 на рис. 1 рассчитана с использованием модифицированной формулы Бете [4] для тормозной способности S_{fe} на свободных электронах плазмы. Кривая 1 на рис. 1 получена с использованием формулы Бете с эффективным зарядом согласно формуле Бетца [5]. Кривая SRIM на рис. 1 описывает полную тормозную способность нейтрального холодного газа водорода, рассчитанную с использованием кода SRIM.

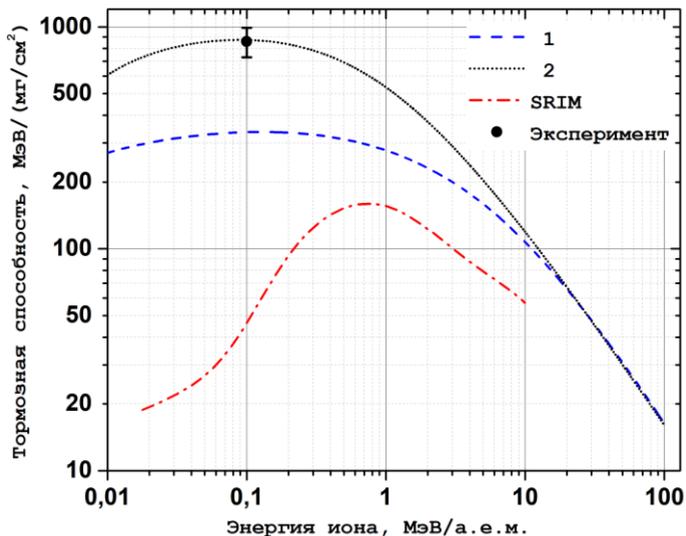


Рис. 1 - Экспериментально полученное значение тормозной способности в зависимости от энергии ионов Fe^{+2} и сравнение с расчетными данными для плазмы и нейтрального (холодный газ) водорода.

Таким образом, получено, что тормозная способность ионизованного водорода более чем в 15 раз превосходит тормозную способность холодного газа для ионов Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м.

Список литературы:

- [1] R.O Gavrilin, A.O. Khurchiev, D.S. Kolesnikov et al. // Stopping power measurement for 100 keV/u Fe ions in hydrogen plasma. GSI Report 2019-2, 2019, p.38-39 <http://dx.doi.org/10.15120/GSI-2019-01053>
- [2] A. Kuznetsov, A. Byalkovskii, R. Gavrilin et al. // Simulation and experimental investigation of hydrogen target plasma parameters for experiments on heavy ion beams deceleration. J. Phys.: Conf. Ser. 666, 2016, DOI:10.1088/1742-6596/666/1/012025.
- [3] Гаврилин Р.О., Хурчиев А.О., Канцырев А.В. и др. // Измерение тормозных потерь ионов железа с энергией 100 кэВ/а.е.м. в водородной плазме. Ядерная физика и инжиниринг, 2020, Т.11, №6, в печати.
- [4] M.M.Basko, Stopping of fast ions in dense plasmas, Sov. J. Plasma Phys., 10 (6) (1984) 689-694
- [5] HANS-DIETER BETZ // Rev. Mod. Phys. 44, 465 (1972)

С.А. ГАНИН, Н.Е. ЕФИМОВ, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.И.
АЛИЕВА С.А. КРАТ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА МИФИСТ

В данной работе приведены расчетные и экспериментальные результаты оптимизации системы создания вихревого магнитного поля учебно-демонстрационного токамака МИФИСТ, а также показаны результаты поиска оптимальной конфигурации управляющих катушек для минимизации вертикального поля индуктора в области горения плазмы.

S.A. GANIN, N.E. EFIMOV, A.S. PRISHVITSYN, A.I.
ALIEVA S.A. KRAT

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

OPTIMIZATION OF THE TRANSFORMER SYSTEM OF THE MEPIST TOKAMAK

This work provides modeling and experimental results of optimization of the system for a vortex magnetic field creating. Also the result of searching of optimal configuration of compensation coils for vertical magnetic field minimization in a plasma area is shown.

МИФИСТ – малый сферический токамак с большим и малым радиусами 25 и 13 см соответственно [1]. Центральный соленоид МИФИСТА имеет воздушный сердечник, вследствие чего возникает необходимость компенсации рассеянного поля индуктора внутри вакуумной камеры. Наиболее часто для этой цели используется система компенсационных полоидальных катушек, которая должна быть оптимизирована таким образом, чтобы суммарная вертикальная компонента магнитного поля в области камеры была минимальной [2]. Оптимизация предполагает выбор числа катушек, их положения и геометрических размеров, а также числа витков и величины тока, текущего в них.

По сравнению с классическим решением, когда каждая из компенсирующих катушек имеет независимую линию питания, в МИФИСТе использована альтернативная схема, в которой все компенсирующие катушки и индуктор включены в одну электрическую цепь с последовательным соединением ее элементов. Подобное

решение позволяет оставить всего одну независимую линию питания и не требует системы синхронизации для отдельных компенсирующих катушек.

Для обеспечения компенсации вертикального поля были рассчитаны положение, геометрические размеры и количество компенсирующих катушек. Дальнейшая оптимизация предполагает определение оптимального числа витков для каждой из катушек.

Из-за сложной геометрии вакуумной камеры, наведенные токи в которой искажают пространственно-временное распределение магнитного поля трансформаторной системы, полное численное решение задачи оптимизации трансформаторной системы представляется слишком ресурсозатратным. По этой причине были проведены экспериментальные работы по оптимизации количества витков в компенсирующих катушках. Были проведены экспериментальные измерения пространственно-временного распределения магнитного поля внутри камеры для различного количества витков в каждой из катушек. Количество витков в эксперименте варьировалось вблизи оптимального значения, найденного в нулевом приближении стационарного магнитного поля в отсутствие вакуумной камеры.

В данной работе представлены некоторые расчетные и экспериментальные результаты оптимизации трансформаторной системы токамака МИФИСТ.

Список литературы

1. Николаева В.Е., Воробьев Г.М., Гаспарян Ю.М. и др.// Вестник НИЯУ МИФИ 2019. Т. 8, № 6, С. 491-497
2. Ahmad Z., Ahmad S., Naveed M.A. et al// Phys. Scr. 2017. Vol. 92, № 4

В.И. ЖУКОВ, Д.М. КАРФИДОВ

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

ФОРМИРОВАНИЕ СВЧ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ В ЗАДАННОМ ПОЛЕ

Исследовано самосогласованное распространение СВЧ разряда на поверхностной волне в кварцевой трубке, помещенной в резонатор открытого типа. Плазменный столб инжeksiруется в резонатор и возбуждает в нем объемное поле, останавливаясь в ближайшем минимуме. Разряд распространяется в виде плазменных фрагментов длиной $\lambda/2$, образуя столб, поддерживаемый поверхностной волной. Показана возможность управления параметрами разряда с помощью подстройки резонатора.

V.I. ZHUKOV, D.M. KARFIDOV

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

MICROWAVE SURFACE-WAVE-SUSTAINED LOW PRESSURE DISCHARGE FORMATION IN A GIVEN FIELD

The self-consistent propagation of a microwave surface-wave-sustained discharge in a quartz tube placed in an open cavity is investigated. The plasma column is injected into the cavity and excites a standing wave. Then it stops in the nearest field minimum. The discharge propagates in the form of plasma fragments $\lambda/2$ long. Thus it forms a column supported by a surface wave. The possibility of controlling the discharge parameters by tuning the resonator is demonstrated.

В работе исследуется развитие СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) [1] в резонаторе открытого типа, образованного двумя плоскопараллельными металлическими зеркалами. Разряд осуществляется в кварцевой трубке длиной 2 м диаметром 27 мм, заполненной воздухом в диапазоне давлений от 0.02 Торр до 2 Торр. ПЭВ возбуждалась волноводным аппликатором [2], подключенным к магнетрону, мощностью 800 Вт, генерирующему импульсы длительностью 50 мс на частоте 2.45 ГГц.

Разряд распространяется по трубке от источника излучения и образует между аппликатором и первым зеркалом резонатора плазменный столб, поддерживаемый ПЭВ (рис.1). Резонатор состоит из двух плоских медных зеркал (31 и 32 на рис.1) радиусом 12 см, через центр которых проходит разрядная трубка. Накачка энергии в резонатор

производилась через отверстие связи в первом зеркале – плазменный столб проникает в резонатор, являясь элементом связи и возбуждая поле в объеме резонатора.

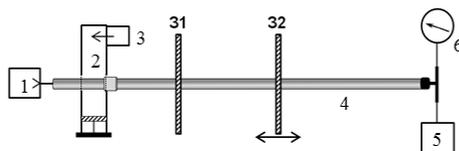


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – Форвакуумный насос; 2 – аппликатор; 3 – магнетрон; 4 – кварцевая трубка; 5 – натекатель; 6 – вакуумметр.

Прошедший в резонатор через отверстие в зеркале 31 плазменный столб играет роль антенны, возбуждающей поле в резонаторе. Сложение объемного поля резонатора с полем в прифронтной области разряда приводит к образованию локального минимума поля, где нарушается условие существования ПЭВ и происходит остановка разряда. Распределение концентрации на границе столба имеет диффузионный характер и спадает от области с критической концентрацией n_s для поверхностной волны с характерным масштабом 1-2 см. Плазма с таким распределением концентрации на границе разряда попадает в область нарастающего в сторону пучности объемного поля резонатора, что приводит к резкому росту ионизации. При достижении критической концентрации n_s поверхностная волна продолжает распространение. Такое развитие разряда продолжается до следующего узла поля, в котором он останавливается, и весь процесс повторяется. Таким образом, разряд распространяется в виде следующих один за другим фрагментов длиной $\sim \lambda/2$ (где $\lambda \approx 12.25$ см – длина волны в свободном пространстве) до исчерпания запасов энергии или до достижения им второго зеркала. Путем подстройки резонатора была показана возможность формирования до 6 плазменных фрагментов. На заключительной стадии распространения разряда происходит формирование плазменного столба с некоторой модуляцией плотности плазмы, по которому распространяется поверхностная волна с $\lambda_s = 11$ см.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90162.

Список литературы

1. Zhukov V.I., Karfidov D.M., K.F. Sergeichev. // Plasma Physics Reports. 2012. Vol. 456 № 8, P. 760–768.
2. Moisan M., Zakrewski Z. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. Vol. 24, p. 1025.

А.А. ЗВОНАРЕВА, А.Ю. МИРОНОВ, Н.В. НАГОРНЫЙ,
А.О. ТОЛОКОНСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

Е.Ю. МИРОНОВА, С.С. ПОРТОНЕ

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии
"Росатом" "Проектный центр ИТЭР"*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ EPICS В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ

Рассмотрено применение свободно распространяемой программной среды EPICS (Argonne National Laboratory), зарекомендовавшей себя в роли программного конструктора систем управления в крупных научных УТС экспериментах (ITER, K-STAR). Распределенные системы управления физическими установками обычно состоят из десятков или даже сотен компьютеров, объединенных в сеть, чтобы обеспечить связь между ними и обеспечить управление и обратную связь для различных частей установки из центральной диспетчерской или даже удаленно через Интернет. EPICS использует модель клиент/сервер для доступа к данным с различных компьютеров. Протоколы, используемые в EPICS, разработаны для программных сетевых приложений с высокой пропускной способностью в реальном времени и являются одной из причин, по которой EPICS удобно использовать для построения одновременно больших и конфигурируемых систем управления.

Помимо набора готовых к применению программных модулей EPICS предполагает использование определённой программно-аппаратной архитектуры. Так, сетевая инфраструктура системы управления опирается на быстрый, специализированный и очень надежный протокол обмена на базе Ethernet, называемый Channel Access (CA), который обеспечивает единый интерфейс между центральной системой управления и местным управлением различных систем. База данных EPICS, содержащая множество управляемых переменных (EPICS PVs) и дающая к ним доступ в реальном времени распределена масштабируемым образом по многим каналам доступа сетевой инфраструктуры.

EPICS позволяет реализовать многие функции, необходимые для выполнения большого физического эксперимента: создать панели управления, объединить управление различными аппаратными средствами измерений и контроля технологических параметров, упростить анализ полученных в результате эксперимента данных.

A.A. ZVONAREVA, A.Yu. MIRONOV, N.V. NAGORNYI,
A.O. TOLOKONSKYI
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

E.Yu. MIRONOVA, S.S. PORTONE
Institution "Project Center ITER"

EPICS SOFTWARE TOOLKIT ROLE IN FUSION EXPERIMENTS

The application of the open license software environment EPICS (Argonne National Laboratory), which has proven itself as a software toolkit for SCADA control systems development for large scientific fusion experiments (ITER, K-STAR), is considered in this article. Distributed control systems for physical plant systems usually consist of tens or even hundreds of computers connected in a network to provide communication between them and provide control and feedback to various parts of the plant from a central control room or even remotely via the Internet. EPICS uses a client/server model to access data from multiple computers. The protocols included in EPICS are designed for software network applications with high bandwidth in real time and are one of the reasons why EPICS is convenient to use for building large and easily configurable control systems.

In addition to a set of ready-to-use software modules, EPICS assumes the use of a specific software and hardware architecture. For example, the network control infrastructure relies on a fast, dedicated and highly reliable Ethernet-based software bus called Channel Access (CA), which also provides a single interface between the central control system and the local control of various systems. The EPICS database, which contains many managed variables (EPICS PVs) and can access them in real time, is distributed in a scalable manner across many network infrastructure access channels.

EPICS allows to implement many of the functions necessary to perform a large physical experiment: create control panels, combine the control of various hardware devices for measuring and controlling technological parameters, and simplify the analysis of the data obtained as a result of the experiment.

Список литературы

1. EPICS, <http://www.aps.anl.gov/epics/index.php>
2. J.B. Lister, J.W. Farthing, M. Greenwald, I. Yonekawa, The ITER CODAC conceptual design, *Fusion Engineering and Design* 82 (2007) 1167–1173.

В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. Б.Р. КАХРАМОНОВ,
ХАРЬЯКОВ В.П.

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ташкент,
Узбекистан.*

К ВОПРОСУ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВАКУУМНОГОДУГОВОГО РАЗРЯДА

Исследована генерация вакуумной дуги пробоем в игнайтере по порошку графита и серебра.

V.NARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. B.R. KAKHRAMONOV,
ХАРЬЯКОВ В.П.

*Institute of ion-plasma and laser technologies, Uzbek Academy of Sciences,
Tashkent, Uzbekistan*

ON THE QUESTION OF INITIATING A VACUUM ARC DISCHARGE

The generation of a vacuum arc by a breakdown in an igniter over a graphite and silver powder is investigated.

Стабильная генерация вакуумной дуги, как в экспериментальных, так и технологических электродных системах является актуальной задачей реализации разрядного процесса. В широко используемых методах искрового и высоковольтного пробоя электроды подвержены разрушению. Для зажигания дугового разряда важны локальная плотность плазмы у катода, и напряженность электрического поля в этом месте катода. [1]. В созданной конструкции поджигателя-игнайтера, представлена на рисунке 1б, 1в., встроен диэлектрический элемент и два электрода, на которые подается поджигающий импульс. Напряжение импульса поджигателя прикладывается к двум молибденовым электродам, находящимся внутри керамической трубочки с двумя каналами. На конце трубочки сделано углубление, и при возникновении поверхностного пробоя, плазма выбрасывается в межэлектродное пространство разрядной системы.

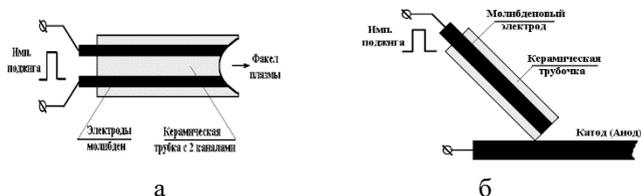


Рис. 1. а- одноэлектродный, б- двухэлектродный игнайтеры.

В разработанном игнайтере, в качестве плазмообразующего материала используется порошок на основе графита и серебра. По графику видно, что, вероятность появления пробоя зависит от расстояния между катодом и поджигом. Игнайтер имеющий в себе смесь порошка графита и серебра, при расстоянии 5 мм, даёт на 10% большее вероятности появления пробоя, чем игнайтер заполненный только графитом.

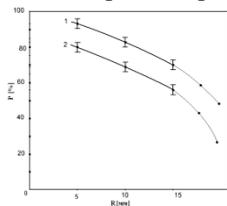


Рис. 2. Вероятность появления дугового разряда Р (%) из 30 попыток, при определенном расстоянии R=5, 10, 15 мм, между поджигом-игнайтером и катодом

При иницировании вакуумного дугового разряда, игнайтер имеющий в себе только смесь графита, срабатывает 80 % (кривая 2). При этом расстояние между катодом и игнайтером-поджигом 5 мм. Игнайтер имеющий в себе не только графита, а ещё порошка серебро, вероятность пробоя 93 %, от всех попыток (кривая 1), на 10% больше предыдущего. Таким образом компоненты, имеющие относительно большую проводимость, играют существенную роль в повышении эффективности работы игнайтера отвечают выполненные на основе керамической трубки с разрядником на торце, заполненным графитовой и серебряной смесью с различными добавками, повышающих эмиссию электронов и ионов.

Список литературы.

- 1 Бойм А. Б., Рейхрудель Э. М. О работе холодного мультикаатода с поджигом в импульсномрежиме //Радиотехника и электроника 1963. Т.8, № 5. С. 845-851.
2. Mesyats G. A., Proskurovskiy D. I. Pulsed electrical discharge in vacuum. Berlin: Springer, 1989.

В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И. Х. ХУДАЙКУЛОВ.
*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ташкент,
Узбекистан.*

ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Процессы в катодном пятне вакуумного дугового разряда при реализации в нем F -эмиссии электронов.

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

Processes in the cathode spot of a vacuum arc discharge during the implementation of the F -emission of electrons in it.

Изучение процессов в КП (катодном пятне) вакуумной дуги является актуальной задачей, для расширения представлений о фундаментальных основах теории КП и развития практических приложений. Особое значение имеет изучение условий, реализации в КП F -эмиссии электронов, роли в этих процессах теплоты испарения атома, атомный вес, работы выхода материала катода. Согласно формуле Мак - Коуна напряженность электрического поля определяется выражением [6,7]:

$$E_c^2 = 7.57 \times 10^5 \cdot U_c^{0.5} \left[\left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{0.5} j_i - j_e \right] (\text{В} \cdot \text{см}^{-2}), 1$$

где U_c – катодное падение потенциала в В; j_i и j_e – соответственно, плотности тока ионов и электронов в $\text{А} \cdot \text{см}^{-2}$; $m_i m_e$ – масса иона и электрона. Так как $(m_i/m_e)^{0.5} \gg 1$ получаем решение: $E_{\text{опт}} = \frac{2.97 \times 10^7 \cdot \varphi^{1.5} \cdot \theta(\gamma)}{0.57 + 0.5(\ln U_c + \ln A_c) - \ln \varphi} (\text{В} \cdot \text{см}^{-1})^2$.

Для катода с $\varphi = 4$ эВ и $A_c = 10^2$ при среднем $U_c = 15$ В получаем $E_{\text{опт}} = 6.45 \times 10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$. Получено что F -эмиссия электронов в КП характерна лишь для катодов с $\lambda_a \leq 1,5 - 1,6$ эВ. Большинство металлов имеет, $\lambda_a > 2 - 2.5$ эВ, и для них характерна $T-F$ -эмиссия электронов в катодном пятне вакуумного дугового разряда. Для анализ условий реализации процессов в катодном пятне на основе доминирования F -эмиссии электронов над взрывными процессами изучено влияние предварительно нанесенных веществ с низкой работой выхода и теплотой испарения, энергозатрат при вакуумно-дуговой обработке изделий.

Теплота испарения атома катода имеет вид: $\lambda_a = \frac{1.12 \times 10^{-8} \cdot E_{\text{опт}} (\lg A - \lg B - 2 \lg E_{\text{опт}})}{\varphi^{0.5}}$ (эВ). 3

Выражение (3), определяющее теплоту испарения атома, при котором имеет место F -эмиссия электронов в КП вакуумной дуги, является полным. Из (2), следует, что теплота испарения атома катода, при котором эмиссия электронов в катодном пятне осуществляется по F -механизму зависит от целого ряда параметров катода (φ , A_c , v_s , V_0) и катодного пятна (U_c , ρ_c , β , g_i), но главное значение имеет работа выхода электрона. Для экспериментального изучения реализации процессов в КП на основе F -эмиссии электронов на поверхность катода наносились: КОН, NaOH и др., материалы. Получено что вероятность формирования КП на стороне образца с КОН выше, чем на поверхности без нанесённого слоя щелочи. (представлена на рис 1)

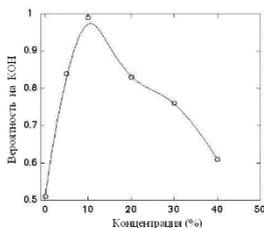


Рис.1. Вероятность зажигания разряда на поверхность катодной пластины образования на ней КП при нанесении КОН

При этом вероятность образования имеет максимальное значение для 10 % концентрации водного раствора КОН, NaOH, и имеет максимум, что важно. Выявлена четкая корреляция между положением экстремума зависимости вероятности формирования КП, величины напряжения на разряде, и скорости очистки от концентрации СВ. Это позволяет предположить, что первичная причина всех изменений на поверхности в присутствии СВ заключается в изменении вероятности образования ЭКП.

Список литературы

1. В.Н. Арустамов, Х.Б. Аишуров, 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.В. КАЧМАР^{1,2}, В.Д. БОРЗОСЕКОВ^{1,2}, Н.Н. СКВОРЦОВА^{1,3},
А.А. СОРОКИН⁴

¹ *Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия*

² *Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия*

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

⁴ *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТАНТАЛА И МОЛИБДЕНА В ГИРОТРОННОМ РАЗРЯДЕ В ПОРОШКЕ РЕГОЛИТА

Исследовано распределение частиц реголита, осажденных на поверхности тантала и молибдена под воздействием импульсного излучения гиротрона. Разработан алгоритм обработки изображений поверхности пластин с целью анализа осажденных частиц. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных для двух видов пластин — необработанных и обработанных диэлектрическим барьерным разрядом.

V.V. KACHMAR^{1,2}, V.D. BORZOSEKOV^{1,2}, N.N.
SKVORTSOVA^{1,3}, A.A. SOROKIN⁴

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

² *People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

³ *National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

⁴ *Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

SURFACE MODIFICATION OF TANTALUM AND MOLYBDENUM INDUCED BY GYROTRON DISCHARGE IN REGOLITH

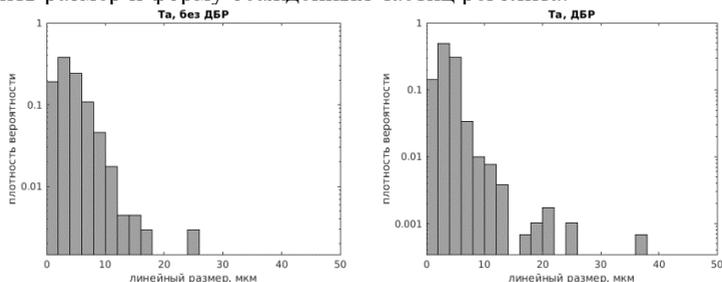
The distribution of regolith particles deposited on the surface of tantalum and molybdenum under gyrotron pulsed radiation is studied. To analyze the deposited particles, an image processing algorithm is developed. A comparative analysis of the results obtained for two types of metal samples — untreated and treated with a dielectric barrier discharge — is carried out.

В настоящей работе представлены результаты имитационного эксперимента, в котором моделировалось воздействие реголита на поверхность тантала и молибдена — тугоплавких металлов, которые находят применение в космическом материаловедении.

Для имитационного эксперимента половина образцов была предварительно обработана диэлектрическим барьерным разрядом. Образцы размещались в плазмохимическом реакторе [1,2] над слоем лабораторного реголита, частицы которого аналогичны лунной пыли по

химическому составу и распределению по размерам. Из-за воздействия на реголит импульсов гиротрона (мощностью до 400 кВт и длительностью до 10 мс) в объеме плазмохимического реактора появлялись левитирующие облака заряженных частиц. В эксперименте воссозданы условия, возникающие при бомбардировке Луны микрометеоритами [3].

Изображения поверхности пластин были получены на сканирующем электронном микроскопе. Для анализа модификации пластин применялись методы компьютерной обработки изображений. Алгоритм, основанный на Фурье- и анизотропной фильтрации и морфологическом попиксельном анализе изображения позволил изучить размер и форму осажденных частиц реголита.



Распределение частиц по размерам на необработанной (слева) и обработанной (справа) пластинах тантала.

В целом, для обоих металлов получены схожие результаты: на необработанные пластины осажжены частицы в основном небольших размеров до ~10 мкм. Причина – мелкие частицы осаждаются вблизи дефектов поверхности. В случае обработанных пластин, на которых дефектов меньше, относительный вклад мелких частиц в распределение по линейным размерам уменьшен.

Список литературы

1. N.N. Skvortsova, D.V. Malakhov, V.D. Stepakhin et al. // JETP Lett., 2017, Vol. 106, pp. 262–267.
2. N.N. Skvortsova, O.N. Shishilov, N.S. Akhmadullina et al. // Ceramics International, 2021, Vol. 47, No. 3, pp. 3978–3987.
3. S.I. Popel, A.P. Golub', A.V. Zakharov et al. // JETP Lett., 2018, Vol. 108, pp. 356–363.

Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ В ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

Проводится исследование взаимодействия разряда в электролите с электродной системой в присутствии магнитного поля. Регистрируется образование микроструктур на поверхности вольфрамовых и титановых катодах. Изучен спектральный состав излучения данного разряда. В случае вольфрамовых катодов происходит возникновение конусоподобных образований размерами 5-20 мкм. Исследуется влияние магнитного поля на появление образований.

D.L. KIRKO, A.S. SAVJOLOV

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

RESEARCH OF MICRO STRUCTURES ON ELECTRODE SURFACE AT ELECTROLYTE DISCHARGE

The research of interaction of electrolyte discharge to the electrode system in magnetic field is carried out. The origin of microstructures on the surface of tungsten and titan electrodes is registered. Spectrum of this discharge has been studied. For a case of tungsten cathodes the origin of cone-like formations with dimensions 5-20 μm is observed. One has researched the influence of magnetic field to the formations appearance.

Разряды в электролитах, как правило, образуются между электродами внутри жидкости, или между электродом и поверхностью жидкости. Данные разряды находят применение для очистки воды и других жидкостей, для полировки металлических поверхностей, и для более эффективного получения водорода [1,2]. В цепи этих разрядов ранее фиксировались различные электрические колебания в диапазоне 100 кГц – 20 МГц [1-4].

Экспериментальная установка для получения разряда в электролите содержала электродную систему, размещенную в объеме жидкости. В качестве электролита использовались растворы карбоната натрия в дистиллированной или технической воде. Возникновение свечения разряда происходило при уменьшении площади катода до размеров с площадью около 0,5-2 мм². Для создания разряда использовалось

импульсное питание с частотой 50-100 Гц, при напряжении 50-250 В, и токе 0,2-1,0 А.

Проводилось изучение различных режимов горения разряда в зависимости от внешнего магнитного поля при величине в диапазоне $B=50-240$ Гс. При этом проводилась фото- и кино-регистрация области разряда с временным разрешением 1 мс. Наблюдается изменение формы разряда или его сжатие в прикатодной области разряда при увеличении магнитного поля. В объеме между электродами действие магнитного поля приводит к регуляризации потоков жидкости.

После определенного времени горения разряда в диапазоне 5-20 мин. изучались поверхности используемых электродов. Для исследования поверхности и элементного состава применялся микроскоп VEGA 3 SEM. Наиболее интересные структуры были обнаружены на катодах в области воздействия разряда. На вольфрамовых катодах наблюдается появление острых и конусных образований с размерами 5-20 мкм. Элементный состав данных структур показывает присутствие наряду с вольфрамом около 65%, также кальция до 25%. Другим видом поверхностных структур в случае вольфрамовых электродов является возникновение образований, напоминающих “пух” или “мох”. На титановых катодах под действием магнитного поля происходит ускоренный рост образований по форме близких к микросферам с диаметрами в области 5-40 мкм. Для объяснения возникновения рассмотренных микроструктур допускается филаментация тока разряда на микронные токовые каналы с размерами 1-5 мкм.

Список литературы

1. Гайсин Ал.Ф., Кашапов Н.Ф., Купутдинова А.И., Мухаметов Р.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88, Вып. 5. С. 717-721.
2. Канарев Ф.М. Низкоамперный электролиз воды. Краснодар: Издательство Краснодарского Университета, 2010, 81 с.
3. Кирко Д.Л. // Физика плазмы. 2020. Т.46, №6, С. 495-502.
4. Kirko D.L., Savjolov A.S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 941, P. 012018.

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

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНООБРАЗНЫХ СТРУКТУР НА ЭЛЕКТРОДАХ В НИЗКОИНДУКТИВНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЕ

Изучались процессы взаимодействия периферийной плазмы низкоиндуктивной вакуумной искры с поверхностью электродов. Регистрируются электрические колебания в цепи разряда в диапазоне 500 кГц-10 МГц. Наблюдается образование трех типов поверхностных микроструктур на стальном аноде. Более подробно проводилось изучение волнообразных структур с размерами в диапазоне 0,1-160 мкм.

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

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

RESEARCH OF WAVE-LIKE STRUCTURES ON ELECTRODES OF LOW INDUCTIVE VACUUM SPARK

The processes of interaction of periphery plasma of low inductive vacuum spark with the surface of electrodes were researched. Electrical oscillations of this discharge in region 500 kHz- 10 MHz are registered. The origin of three types of surface microstructures is observed. More detail the research of wave-like structures with dimensions in range 0,1-160 μm was observed.

Плазменный фокус является достаточно эффективным источником высокотемпературной плазмы при экспериментах с наполнением камеры дейтерием [1,2]. Процесс пинчевания разряда также может быть получен на металлической плазме в низкоиндуктивной вакуумной искре [3]. В экспериментах изучались электрические колебания в цепи разряда, которые были сопоставлены с плазменными волнами [4].

Устройство низкоиндуктивной вакуумной искры содержит два электрода, расположенные в вакуумной камере. В качестве анода используется заостренный стержень диаметром 3-5 мм, и катода - цилиндр диаметром 10-15 мм. Электроды изготавливаются из стали (Ст. 45) или меди. Для питания разряда используется емкостной накопитель с напряжением 10-15 кВ. Разряд инициируется тригерным поджигом, при токе разряда в диапазоне 40-150 кА и периоде 8,5 мкс. Около

поверхности анода наблюдается формирование пинча и образование плазменных точек, излучающих рентгеновское излучение в диапазоне 1-30 кэВ. Временные зависимости рентгеновского излучения регистрировались с использованием сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя. Для изучения высокочастотных колебаний в цепи разряда использовались магнитные зонды. Было зафиксировано наличие колебаний в диапазоне 500 кГц- 10 МГц.

Разряд содержит мощное воздействие плазменных потоков на поверхность электродов, при котором происходит интенсивное плавление и испарение поверхностного слоя металла, и возникновение различных микроструктур. Наибольшему влиянию подвергается заостренная поверхность анода.

Проводилось изучение микроструктуры поверхности электродов после воздействия разряда при количестве выстрелов 1-100. Для исследования поверхности и элементного состава использовался микроскоп VEGA 3 SEM. На поверхности анода были зафиксированы различные виды структур: нитевидные, похожие на “пух”, и волнообразные. Наибольший интерес представляли волнообразные структуры, расположенные вблизи оконечности анода. Данные образования имели различные длины волн и форму. Максимальные волны имели размеры в диапазоне 80-160 мкм, меньшие – размеры в области 5-30 мкм, и самые маленькие: 0,1-3 мкм. Возможное объяснение предполагает быстрое расплавление поверхностного слоя металла электрода под действием потока плазмы, и влияние плазменных волн, формирующих данную поверхностную структуру с последующим остыванием и кристаллизацией данного слоя электрода.

Список литературы

1. Shumlak U. // J. Appl. Phys., 2020, Vol.127, P. 200901-1.
2. Жданов С.К., Трубников Б.А. // Письма в ЖЭТФ, 1978, Т.28, №2, С.61-65.
3. Башутин О.А., Савелов А.С. // Физика плазмы, 2016, Т.42, №4, С. 352-360.
4. Kirko D.L., Savjолоv A.S. // J. Phys.: Conf. Ser., 2018. Vol. 1115, P. 022010.

Д.С. КОЛЕСНИКОВ, А.В. СКОБЛЯКОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ,
А.А. ГОЛУБЕВ

*Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И.
Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский
институт», Москва, Россия*

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СПЕКТРОГРАФОМ СКОЛЬЗЯЩЕГО ПАДЕНИЯ

Разработана методика восстановления спектров рентгеновского излучения плазмы тераваттного Z-пинча, зарегистрированных дифракционным спектрографом скользящего падения на установке Ангара 5-1. Для расчета аппаратной функции спектрографа в среде Geant4 разработана его виртуальная Монте-Карло модель. С использованием результатов моделирования проведено исследование параметров аппаратной функции, получено ее аналитическое приближение. Выполнена реконструкция экспериментальных спектров, полученных на установке Ангара 5-1.

D.S. KOLESNIKOV, A.V. SKOBLIAKOV, A.V.
KANTSYREV, A.A. GOLUBEV

*Institute for Theoretical and Experimental Physics named by A.I. Alikhanov of
National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

METHOD FOR RECONSTRUCTION OF Z-PINCH X-RAY SPECTRUM OBTAINED BY GRAZING-INCIDENCE SPECTROMETER

Method for reconstruction of a terawatt Z-pinch X-ray plasma spectrum obtained by grazing incidence diffraction spectrometer at Angara 5-1 facility developed. In order to compute the instrumental function of spectrometer its virtual Monte-Carlo model developed. Parameters of the instrumental function analyzed with the use of simulation results and its analytical approximation obtained. Reconstruction of experimental spectra obtained on the Angara 5-1 facility performed.

Информация о рентгеновском спектре излучения, эмитируемого плазмой тераваттного Z-пинча, необходима для понимания и описания протекающих в нем физических процессов и построения физических и математических моделей поведения вещества в экстремальном состоянии.

Для регистрации рентгеновских спектров излучения плазмы Z-пинча на установке Ангара 5-1 [1] применяется спектрограф скользящего падения [2], использующий вогнутую дифракционную

решетку. Основными проблемами, препятствующими достоверному качественному и количественному восстановлению входных спектров из данных, считываемых в плоскости регистрации спектрографа, являются наложение сигналов от разных порядков дифракции и сложный вид аппаратной функции прибора, зависящий от длины волны регистрируемого излучения. Данная задача не имеет тривиального аналитического решения.

Для расчета аппаратной функции спектрографа в среде Geant4 разработана виртуальная модель, позволяющая, с учетом физических процессов взаимодействия рентгеновского излучения с дифракционной решеткой и геометрии эксперимента, выполнять построение спектров на плоскости детектора спектрографа. С использованием данных, полученных Монте-Карло моделированием спектрографа, проведено исследование параметров аппаратной функции в зависимости от длины волны регистрируемого излучения, получено ее аналитическое приближение.

Разработана методика реконструкции входного спектра излучения Z-пинча с учетом вклада аппаратной функции спектрографа. Восстановление входного спектра достигается последовательным приближением его формы функциями Максвелла до достижения хорошего совпадения между результатом их свертки с аппаратной функцией и экспериментальным сигналом на плоскости детектора. Восстановлены спектры излучения плазмы Z-пинча для двух экспериментов на установке Ангара 5-1.

Работа проведена при поддержке НИОКР Договор от 31.07.2020 №1770641334820001060/226/2856-Д (ИГК №1770641334820001060)

Список литературы

1. Альбиков З.А. и др., Импульсный термоядерный комплекс "Ангара-5-1" // Атомная энергия, 1990, Т. 68, Вып. 1, С. 26-35.
2. А.П. Шевелько, Д.Е. Блисс, Е.Д. Казаков // Физика плазмы 34 (11), 2008, стр. 1021-1032

А.А. КОЛЕСНИЧЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
КОМПОНЕНТОВ ПУЧКОВОГО ТРАКТА СИСТЕМЫ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТЯР
В ПРОЕКТЕ ДЕМО-ТИН**

Выполнены теплофизические расчеты элементов инжекционного тракта и сформулированы соображения по организации эффективного отведения поглощённой мощности для внесения соответствующих доработок в инженерно-технический проект СНИ. Данные расчеты производятся на основании предварительных оценок полных потерь мощности, а также с использованием распределения нагрузок на всех компонентах СНИ. Работа поддержана НИЦ «Курчатовский институт» (28.09.2020 № 1934а).

A.A.KOLESNICHENKO

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

**MODELING OF THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF
THE COMPONENTS OF NEUTRAL BEAM INJECTION FOR
PLASMA HEATING FOR FUSION NEUTRON SOURCE
DEMO-FNS**

Thermophysical calculations were performed of the elements of the neutral beam injecton and considerations on the organization of effective power absorption were formulated to make appropriate modifications in the engineering design. These calculations are performed on the basis of the preliminary estimates of the total power losses. The work is supported by NRC "Kurchatov Institute". (28.09.2020 № 1934а).

Наиболее перспективным источником энергии на сегодняшний день является реакция атомного деления, однако у данного вида энергетики есть свои проблемы (переход к замкнутому топливному циклу, ограниченность топливных ресурсов для реакторов атомных электростанций и недостаток нейтронов для расширения топливной базы для реакторов на тепловых нейтронах, утилизация отработанного ядерного топлива. Для демонстрации коммерческой привлекательности термоядерной энергетики рассматривается проект DEMO, который совместно с ITER может быть использован для производства

электроэнергии. Тем не менее, использование реакции термоядерного синтеза на сегодняшний день не может конкурировать с реакторами деления по производству коммерческой электроэнергии и решения задач ядерного топливного цикла.

Существующая необходимость расширенного производства нейтронов для задач ядерной энергетики может быть решена, например, путем совместного использования реакций синтеза и деления в одной установке. Кроме производства электроэнергии, гибридные реакторы могут решать проблемы обеспечения топливом тепловых реакторов, утилизации ОЯТ тепловых реакторов и др.

Отличительной особенностью установок данного типа являются сниженные (более чем в 10 раз) требования по тепловым нагрузкам на элементы установки по сравнению с ITER и DEMO, а также их относительная компактность. Проект DEMO-ТИН является пилотным проектом РФ по созданию гибридной установки и базируется на существующих технологических решениях.

Работа гибридной установки или источника термоядерных нейтронов (ТИН) на основе токамака потребует нагрева плазмы и поддержания тока в ней с помощью инъекции пучков быстрых атомов [1]. В проекте DEMO-ТИН предполагается использовать шесть инжекторов для обеспечения мощности дополнительного нагрева до 30 МВт. Задача эффективной транспортировки пучка в системе нейтральной инъекции (СНИ) требует многопараметрической оптимизации для снижения потерь пучка и ограничение тепловых нагрузок на компонентах инжектора до величин, допускающих эффективное охлаждение [3].

В данной работе выполнены теплофизические расчеты элементов инжекционного тракта и сформулированы соображения по организации эффективного отведения поглощённой мощности для внесения соответствующих доработок в инженерно-технический проект СНИ. Работа поддержана НИЦ «Курчатовский институт» (28.09.2020 № 1934а).

Список литературы

1. Ананьев С.С., Е.Д. Длугач, А.И. Крылов, Б.В. Кутеев, А.А. Панасенков — ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1.
2. Azizov E.A., Ananyev S.S., Belyakov V.A. et al. — Physics of Atomic Nuclei, 2016, vol. 79, № 7, pp. 1125—1136
3. Ананьев С.С., Е.Д. Длугач, Б.В. Кутеев, А.А. Панасенков — ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 3.

С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ

*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия
Московский Физико-Технический Институт, Долгопрудный, Россия*

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОЛЛАЙДЕРА NICA С ВЫСОКОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Исследованы способы повышения критической энергии для протонной опции коллайдера NICA. Применен метод суперпериодической модуляции градиентов квадрупольей. Осуществлен выбор секstupольей для подавления натуральной хроматичности и компенсации секstupольной компоненты. Приведены параметры Твисса для предложенных структур, а также исследованы динамические апертуры и рабочие точки.

S.D. KOLOKOLCHIKOV, Y.V. SENICHEV

*Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia
Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

MAGNETO-OPTICAL STRUCTURE OF THE NICA COLLIDER WITH HIGH CRITICAL ENERGY.

Methods of increasing the critical energy for the proton option of the NICA collider are investigated. The method of superperiodic modulation of quadrupole gradients is applied. The selection of sextupoles is carried out to suppress the natural chromaticity and compensate for the sextupole component. The Twiss parameters for the proposed structures are given, as well as the dynamic apertures and working points are investigated.

Для увеличения критической энергии ускорительного кольца NICA рассматривается возможность изменения дисперсионной функции путем модуляции градиентов квадрупольей на поворотных арках кольца. Для этого рассматривается суперпериод, состоящий из 3-х ФОДО ячеек, где центральный фокусирующий квадруполь отличается от двух крайних большим значением градиента.

Для одного суперпериода коэффициент расширения орбиты определяется по формуле [1]:

$$\alpha_s = \frac{1}{v_{x,арк}^2} \left\{ + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{R}_{arc}}{v_{x,арк}} \right)^4 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{g_k^2}{(1 - kS/v_{x,арк}) [1 - (1 - kS/v_{x,арк})^2]^2 \dots} \right\}, \quad (1)$$

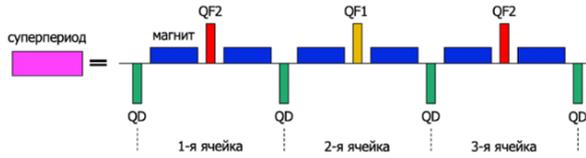


Рисунок 2 Введение суперпериода, состоящего из 3-х ФОДО ячеек

Первая гармоника $k = 1$ является определяющей и для 12 ФОДО ячеек

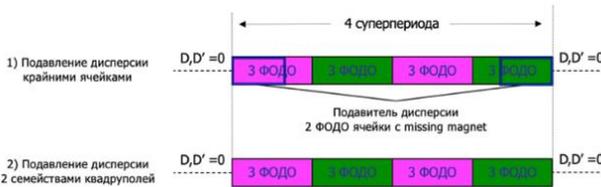


Рисунок 3 Принципиальная схема двух возможных вариантов подавления дисперсии для протонной опции коллайдера NICA

реализуемо условие для количества суперпериодов $S = 4$, $\nu_{x, \text{арк}} = 3$, где 3 ФОДО ячейки объединены в один суперпериод.

Учитывая особенность структуры коллайдера NICA, наличие missing-магнитов на двух крайних ячейках не дает возможность создать полностью регулярную арку из 4-х одинаковых суперпериодов. Таким образом, необходимо обеспечить подавление дисперсии на краях арки. Рассматриваются 2 возможных случая подавления дисперсии:

1) Подавление дисперсии при помощи крайних суперпериодов. А именно двух крайних ФОДО ячеек.

2) Подавление дисперсии всей аркой, при помощи выбора градиентов квадруполей двух семейств.

Оба приведенных способа повышения критической энергии позволяют достичь требуемого значения критической энергии, однако имеют свои особенности при конечной реализации.

Список литературы

1. Yu. V. Senichev and A. N. Chechenin. Theory of “Resonant” Lattices for Synchrotrons with Negative Momentum Compaction Factor. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2007, Vol. 105, No. 5, pp. 988–997

А.В. БЕРНАЦКИЙ, В.В. ЛАГУНОВ, В.Н. ОЧКИН

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

ДИНАМИКА ПЛОТНОСТИ МОЛЕКУЛ O₂ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

В настоящей работе описываются результаты измерений поведения во времени концентраций кислорода в плазме тлеющего разряда в смесях He + O₂ методом диодной лазерной спектроскопии во внешнем резонаторе.

A. V. BERNATSKIY, V. V. LAGUNOV, V. N. OCHKIN

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

DYNAMICS OF THE DENSITY OF O₂ MOLECULES IN A GLOW DISCHARGE

In this paper, we describe the results of measurements of the time behavior of the oxygen concentration in the plasma of a glow discharge in mixtures of He + O₂ by the method of diode laser spectroscopy in an external cavity.

Для мощных реакторов, включая ИТЭР, важен контроль чистоты плазмы в условиях возможного проникновения в рабочую среду таких молекул как O₂ и H₂O из атмосферы, контура охлаждения и включений в стенках. К настоящему времени выполнен большой объем исследований химического состава пристеночной плазмы, в основном методами эмиссионной спектроскопии и актинометрии [1]. Эти методы, однако имеют ограничение в отношении определения концентрации дипольных молекул кислорода в основном состоянии O₂(X³Σ) ввиду сложности электронно-колебательных полос. Такие измерения единичны и анализ проводится, в основном методами моделирования плазмохимической кинетики [2]. Исключение составляет работа [3], в которой определялись концентрации O₂(X³Σ) в плазме с ВЧ возбуждением смеси кислорода с углеводородами и был сделан вывод, что гетерогенные процессы важны в формировании состава плазмы.

В настоящей работе описываются результаты измерений поведения во времени концентраций кислорода в плазме тлеющего разряда в смесях He + O₂ методом диодной лазерной спектроскопии во внешнем резонаторе по переходу в поглощении O₂(X³Σ - b³Σ) в области 764 нм. Для выявления характера влияния стенок измерения проводились с включением и выключением разряда. Рис. 1 иллюстрирует характерную динамику концентрации O₂ для двух различных времен

предварительной откачки разрядной трубки перед наполнением ее смесью $\text{He}+\text{O}_2$ и включением разряда. При более продолжительной откачке на всех стадиях протекания разряда убыль кислорода увеличивается. Результаты повторных экспериментов хорошо воспроизводятся. Это связывается нами с адсорбцией кислорода поверхностью кварцевой разрядной трубки. Более длительная откачка освобождает большее число центров адсорбции кислорода. Общими чертами процесса является то, что на начальной стадии разряда происходит быстрый распад молекул в объемных реакциях, сопровождаемых более медленными гетерогенными процессами абсорбции. После выключения разряда (на рис. 1 после 250с после зажигания) происходит некоторое восстановление концентрации. Мы полагаем, что это свидетельствует о механизме преимущественной адсорбции атомов O , возникших в разряде и вновь образующих молекулы в процессе десорбции.

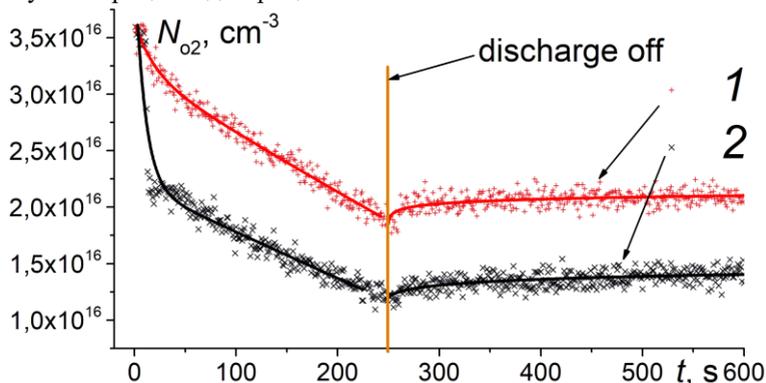


Рис. 1. Изменение концентрации O_2 в разряде и после его выключения. Газ ($[\text{O}_2]=3,6 \cdot 10^{16} + [\text{He}]=1,4 \cdot 10^{16}$) cm^{-3} при предварительной откачке трубки 1 час (1) и 18 часов (2). Ток разряда 4 мА.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00310).

Список литературы

1. A.V. Bernatskiy, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin // Plasma Physics Reports. 2020, V. 46, No. 9, P. 874-919. <https://doi.org/10.1134/S1063780X20090020>
2. A.V. Bernatskiy, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin // Plasma Sources Science and Technology. 2019, V. 28, No. 10, 105002 (10pp). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab4301>
3. C. Busch, I Moller and H Soltwisch // Plasma Sources Science and Technology. 10 (2001) 250–259 <https://doi.org/10.1088/0963-0252/10/2/314>

И.Г. Лебо, Г.В. Долголева

*МИРЭА Российский технологический университет, Москва, Российская
Федерация*

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ЯДЕРНО-ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ЛАЗЕРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Обсуждается возможность создания мощного источника термоядерных нейтронов инициируемых с помощью лазерных импульсов для гибридного реактора. На основании численных расчетов показано, что в мишенях, выполненных в виде двухсторонних конусов, при поглощенной энергии KrF-лазера (либо Nd-лазера на 3-й гармонике) ~ 1 МДж и длительности импульса ~ 100 нс можно достичь коэффициента усиления $G \geq 1$. Такой коэффициент усиления позволит начать опытно-конструкторские работы по созданию гибридного ядерно-термоядерного реактора.

I.G. LEBO, G.V. DOLGOLEVA

Russian Technological University MIREA, Moscow, Russia

ON THE ISSUE OF NEUTRON SOURCE DEVELOPMENT FOR A LASER-DRIVEN NUCLEAR-THERMONUCLEAR REACTOR.

It is discussed the feasibility of developing a high-power thermonuclear neutron source for hybrid reactor, driven by laser pulses. Using 1D numerical simulations for targets made in the form of double-sided cones, for an absorbed energy of a KrF-laser (or 3-rd harmonics of Nd-laser) ~ 1 MJ and pulse duration ~ 100 ns it is possible to achieve gain $G \geq 1$. This neutron yield is a prerequisite to the commencement of work to develop a hybrid nuclear-thermonuclear reactor.

Чтобы замкнуть энергетический цикл в гибридном ядерно-термоядерном реакторе, нужно удовлетворить неравенству

$(1-\phi)\beta(0.2+0.8M)G-1/\eta > 0$ (подробнее смотри [1,2,3]). Здесь η - КПД лазера, G – коэффициент усиления в мишени, β – КПД преобразования тепловой энергии в электрическую, ϕ – доля энергии, которая идет на обеспечение работы реактора, M – коэффициент умножения энергии в урановом blankets. При $\eta \geq 0.05$, $M=60$, $\beta=0.6$, $\phi=0.3$, достаточно $G \approx 1$, чтобы «замкнуть» энергетический цикл.

В [3,4,5] рассмотрена схема мишени в виде встречных конусов и облучения ее комбинированным «длинный+короткий» лазерными импульсами [6].

Расчеты сжатия одного конуса были выполнены по программе «Атлант» [3,4] и сравнивались с данными, полученными по программе «СНД» [5]. Получены параметры мишеней и лазерных импульсов для достижения $G \sim 1$ на уровне поглощенной энергии $E_l \sim 1$ МДж для длинного импульса КгF и 3-й гармоники Nd-лазеров. Вопрос о локальном удержании и подогреве горячего серией коротких импульсов требует дополнительных исследований.

Следует обратить внимание, что в протяженной плазме реакторных мишеней ($L = \rho / \text{grad} \rho \sim 1$ мм) возможно развитие тепловой самофокусировки даже для случая коротковолнового излучения ($\lambda = 0.25$ мкм) [7]. Эксперименты, проведенные в ФИАН [8], указывают на это обстоятельство.

1. Басов Н.Г. и др. // Квантовая электроника, 14(10),2068, (1987)
2. Басов Н.Г., Субботин В.И., Феокистов Л.П. // Вестник РАН, 63, 878, (1993)
3. Лебо И.Г., Исаев Е.А., Лебо А.И. // Квантовая электроника, 47(2), 106, (2017)
4. Лебо И.Г. // Квантовая электроника, 30(5), 409, (2000).
5. Долголева Г.В., Лебо И.Г. // Квантовая электроника, 49(8), 796, (2019)
6. Zvorykin V.D., Lebo I.G. // Laser and Particle Beams, 17, 69, (1999)
7. Лебо И.Г. // Российский технологический журнал, 1, (2021)
8. Zvorykin V.D. et al. // Matter and Radiation at Extremes. 5,03541, (2020)

В.Ю. ЛИСЕНКОВ, А.В. КАЗИЕВ, М.М. ХАРЬКОВ,
А.В. ТУМАРКИН, Н.Н. САМОТАЕВ, К.Ю. ОБЛОВ, А.В.
ИВАНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК МЕДЬЮ В МАГНЕТРОНЕ С РАСПЛАВЛЕННЫМ КАТОДОМ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ НАНЕСЕННОГО СЛОЯ

Изучается возможность создания металлизированных керамических пластинок с использованием магнетрона с расплавленным катодом для применения в (микро)электронном производстве. Проведен анализ существующих методов металлизации, выявлены их преимущества и недостатки. Подготовлены образцы и проведен ряд экспериментов по нанесению меди на керамику Al_2O_3 в магнетроне с теплоизолированной мишенью в режиме самораспыления в разных условиях. Оценены адгезионные и электрические свойства полученных образцов.

V.Yu. LISENKOV, A.V. KAZIEV, M.M. KHARKOV,
A.V. TUMARKIN, N.N. SAMOTAEV, K.Yu. OBLOV, A.V.
IVANOVA

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

METALLIZATION OF CERAMIC SUBSTRATES WITH COPPER IN HOT TARGET MAGNETRON AND RESEARCH ON PROPERTIES OF DEPOSITED LAYER

The possibility of creating metallized ceramic plates in a magnetron with hot target for applications in (micro)electronic production is studied. The analysis of existing methods of metallization is carried out, their advantages and disadvantages are revealed. Samples were prepared, and a number of experiments were carried out on the deposition of copper on Al_2O_3 ceramics in a hot target magnetron in the self-sputtering mode under different conditions. The adhesive and electrical properties of the obtained samples were evaluated.

При производстве металлизированных подложек для нужд электроники, возникает ряд трудностей. Главная заключается в том, что из-за разницы

теплового коэффициента линейного расширения (ТКЛР) меди и керамики в результате многочисленных термоциклов в керамике возникают трещины, параллельные поверхности подложки [1]. Это приводит к тому, что, как минимум, ухудшается теплопередача от меди, а как максимум, медь просто отслаивается, что в конечном счете приводит к отказу модуля. Возникает потребность в использовании промежуточных компенсационных слоев, которые амортизируют возникающие напряжения в соединении при температурных колебаниях и позволяют таким образом повысить адгезионную стойкость.

В данной работе исследуется возможность нанесения слоя меди на керамические подложки в рамках магнетронного напыления с целью их дальнейшего использования в качестве плат и корпусов в электронике.

В ходе проведения ряда экспериментов для некоторых из образцов первые ~ 10 мин распыление производилось при малых мощностях (200 - 300 Вт) в среде кислорода с целью создания промежуточного слоя для компенсации механического напряжения, связанного с разницей ТКЛР.

Четырёхзондовым методом оценено удельное сопротивление медных слоев на полученных образцах. Для всех образцов удельное сопротивление получилось примерно одинаковым и равным $\rho \approx 1,7 \times 10^{-8} \text{ Ом} \times \text{м}$, что хорошо соответствует удельному сопротивлению чистой меди: $1,71 \times 10^{-8} \text{ Ом} \times \text{м}$.

На рисунке 1 показаны изображения одного из полученных образцов.

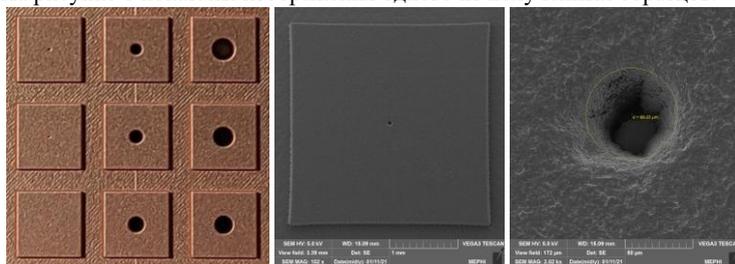


Рисунок 1. Слева — фотография участка образца, в центре и справа — СЭМ изображения одной из тестовых площадок с переходным отверстием.

Список литературы

1. M. Lederer, A.B. Kotas, G. Khatibi, H. Danninger. Characterization of Adhesion Properties by Delamination of Ceramic-Metal Interfaces in Four Point Bending. TTP. 2018.

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ С ПЛАЗМОЙ, ОБРАЗОВАННОЙ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ ИНЕРТНОГО ГАЗА

Рассмотрено взаимодействие низкочастотной пробной электромагнитной волны со слабоионизованной плазмой, полученной при многофотонной ионизации инертных газов. Показано, что в режиме нормального скин-эффекта из-за эффекта Рамзауэра-Таунсенда обусловленное столкновениями фотоэлектронов с нейтральными атомами поглощение волны возрастает. Выявлены условия, в которых отклик плазмы инертного газа на воздействие пробного поля подобен отклику диэлектрика.

K. YU. VAGIN¹, T. V. MAMONTOVA^{1,2}, S. A. URYUPIN^{1, 2}

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

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

INTERACTION OF LOW-FREQUENCY FIELD WITH PLASMA PRODUCED BY MULTIPHOTON IONIZATION OF INERT GASES

The interaction of a low-frequency probe electromagnetic wave with a weakly ionized plasma produced by multiphoton ionization of inert gases is considered. It is shown that in the normal skin effect regime, the absorption of the wave, caused by collisions of photoelectrons with neutral atoms, increases due to the Ramzauer-Townsend effect. We reveal conditions in which the response of the inert gas plasma to a probe field is similar to that of a dielectric.

Фотоионизованная плазма инертных газов имеет необычные свойства. Одной из причин появления новых свойств является эффект Рамзауэра-Таунсенда (см., например, [1,2]). Ниже показано, к каким изменениям коэффициента поглощения низкочастотного излучения в фотоионизованной плазме приводит наличие этого эффекта. Примем, что слабоионизованная плазма, полученная при многофотонной ионизации инертного газа, занимает полупространство $z > 0$. Функцию распределения фотоэлектронов аппроксимируем функцией вида $f(v) = n/4\pi v_0^2 \delta(v - v_0)$, где n - плотность фотоэлектронов, v_0 - скорость фотоэлектронов после ионизации. На плазму по нормали к поверхности падает электромагнитная волна с частотой ω . Следуя обычной процедуре посредством совместного решения кинетического уравнения

и уравнений Максвелла, находим поле в плазме и коэффициент поглощения $A(\omega)$. В случае воздействия низкочастотной волны для коэффициента поглощения находим [2]

$$A(\omega) \approx \omega_L^{-1} \sqrt{8\nu\omega} (1 - \alpha/3)^{-1/2}, \quad \nu(1 - \alpha/3) \gg \omega, \quad (1)$$

$$A(\omega) \approx 4\nu\sqrt{\nu^2 + \omega^2} (\nu + \sqrt{\nu^2 + \omega^2})^{-2}, \quad \nu(1 - \alpha/3) \ll \omega \ll \nu, \quad (2)$$

где ω_L – плазменная частота, ν – частота столкновений фотоэлектронов с нейтральными атомами, $\alpha = \partial \ln \nu / \partial \ln \nu_0$. Значения параметра α , учитывающего эффект Рамзауэра-Таунсенда, для ксенона и криптона представлены на рисунке 1. Область характерных значений энергий фотоэлектронов после многофотонной ионизации соответствует положительным значениям параметра α .

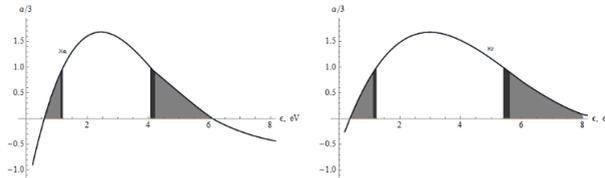


Рис.1. Значение параметра $\alpha/3$ от средней энергии фотоэлектронов для ксенона и криптона.

Согласно (1) и (2) наличие параметра α приводит к возможности двух режимов проникновения и поглощения низкочастотного поля в плазму инертных газов. Соотношение (1) имеет место в режиме нормального скин-эффекта. Эффект Рамзауэра-Таунсенда приводит к увеличению поглощения в $(1 - \alpha/3)^{-1/2}$ раз, если энергия фотоэлектронов в плазме меньше 0.5eV или больше 4 eV для ксенона и меньше 0.5eV или больше 5eV для криптона (см. крайние темные области на рис.1).

Напротив соотношение (2) отвечает условиям $\alpha \approx 3$ (узкие темные полосы на рис.1), в которых отклик плазмы на воздействие излучения подобен отклику диэлектрика. При этом действительная часть диэлектрической проницаемости плазмы положительна и существенно больше мнимой части. Согласно (2) при $\nu \ll \omega_L$ коэффициент поглощения пропорционален частоте столкновений, а при $\nu \gg \omega_L$ возрастает до единицы, что соответствует полному прохождению излучения вглубь слабоионизованного газа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-32-90158.

Список литературы

1. Bogatskaya, A.V., Popov, A.M. *Jetp Lett.* 97, 388–392 (2013).
2. K. Yu. Vagin, T. V. Mamontova, and S. A. Uryupin. *Phys. Rev. A* 102, 023105 (2020).

Е.Д. МАРЕНКОВ¹, А.С. КУКУШКИН^{1,2}, А.А. ПШЕНОВ^{1,2}
¹*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,*
Россия

²*РЦ Курчатовский институт, Москва, Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЛИТИЕВОЙ МИШЕНИ ДИВЕРТОРА В КОДЕ SOLPS 4.3

Модифицирована модель эрозии материалов, контактирующих с плазмой, используемая в коде SOLPS 4.3: включены эффекты термического распыления и испарения, сильно зависящие от температуры мишени. Проведены расчеты дивертора с литиевой мишенью в геометрии токамака Т15-МД. Показано, что возникает эффект экранирования, который не позволяет потоку тепла на мишень превысить 8 МВт/м². Вместе с тем, загрязнение плазмы литием в режимах с высокой мощностью оказывается существенным, что не позволяет рассматривать экранирование как достаточный механизм контроля нагрузки на мишень.

E.D. MARENKOV¹, A.S. KUKUSHKIN^{1,2}, A.A. PSHENOV^{1,2}
¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

²*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

MODELING OF VAPOR SHIELDING OF LIQUID LITHIUM DIVERTOR TARGET WITH SOLPS 4.3 CODE

We have implemented a new erosion model in SOLPS taking this dependence into account. Simulations of the T15-MD tokamak divertor with Li-coated divertor targets have been performed. Li erosion is determined by physical sputtering, evaporation, and thermal sputtering. The results of the simulations show that the shielding effect occurs, providing a reduction of the target heat flux to the values below 8 MW/m². At the same time, the upstream plasma dilution in the high power regimes, where shielding is most efficient, is very strong, meaning that practically, it may be difficult to rely on the shielding effect for the heat flux control in the configuration considered.

Жидкометаллические компоненты, контактирующие с плазмой, рассматриваются как альтернатива металлической конструкции ИТЭР и некоторых вариантов ДЕМО. В качестве таких металлов предлагается, в основном, использовать литий (Li), олово (Sn), или их сплав. Ожидается, что при достаточно большой скорости возобновления такого покрытия, оно может защитить основной материал конструкции. Эксперименты, проводимые на линейных плазменных установках, например, Pilot-PSI, PSI-2, PISCES-B, КСПУ, показали, что достичь

соответствующей скорости возобновления вполне возможно. Было предложено несколько вариантов конструкции мишени с возобновляемым покрытием, «выживающим» при тепловых нагрузках, соответствующим условиям дивертора, как стационарным, так и импульсным.

Однако эти в общем-то оптимистичные результаты трудно напрямую экстраполировать на токамак. Поэтому большое значение имеет моделирование в кодах, описывающих пристеночную плазму в токамаке. Мы модифицировали код SOLPS 4.3, добавив в него процессы эрозии, зависящие от температуры мишени. В настоящей работе мы представляем первые результаты моделирования литиевой мишени дивертора в коде SOLPS 4.3. в конфигурации токамака T15-МД. Эрозия мишени складывается из трех компонент: физического распыления, термического распыления и испарения.

Конфигурация T15-МД включает 2 диверторные мишени, в настоящей работе термическая эрозия включена только для внешней мишени. Была выполнена серия расчетов с фиксированным полным числом водорода (H) в пристеночной плазме, $N_{\text{tot}} = 10^{20}$. При этом изменялась полная мощность, переносимая через сепаратрису в пределах $P_{\text{sep}} = 6 - 20$ МВт. Результаты показали, что при мощности $P_{\text{sep}} > 10$ МВт эрозия Li становится достаточно сильной и экранирование приводит к уменьшению потока тепла на мишень. При этом наблюдается эффект насыщения, из-за которого максимальная нагрузка на мишень не превосходит 7 МВт/м². Этот эффект является характерной особенностью экранирования, изученной ранее в экспериментах на линейных установках и теоретически.

Даже при максимальной мощности $P_{\text{sep}} = 20$ МВт поток эрозии остается относительно низким, порядка 10^{22} м⁻²с⁻¹, в то время как существующие конструкции мишени позволяют выдерживать потоки до 10^{25} м⁻²с⁻¹, так что возобновление покрытия не должно представлять проблем.

Вместе с тем, сильная эрозия приводит к существенному загрязнению плазмы литием. Уже при $P_{\text{sep}} = 10$ МВт оно становится порядка 40% в области сепаратрисы. Кроме того, увеличение электронной плотности, связанное также с появлением примеси Li, приводит к превышению предела Гринвольда, который мы оценили как $3.5 \cdot 10^{19}$ м⁻³, при $P_{\text{sep}} = 14$ МВт. Увеличение N_{tot} , которого можно достичь напуском H, приводит к снижению загрязнения плазмы Li, но также

увеличивает электронную плотность. Следовательно, в рассмотренной нами конфигурации и режиме работы дивертора экранирование не дает практических преимуществ, несмотря на формальное снижение потока тепла.

К. Г. МОШКИНА ^{1,2}, В. Д. БОРЗОСЕКОВ ^{1,2},
Н. Н. СКВОРЦОВА ^{1,3}, А. А. СОРОКИН ⁴

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

² *Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва, Россия*

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

⁴ *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия*

ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО НАПЫЛЕНИЮ РЕГОЛИТА НА ПЛАСТИНЫ ТАНТАЛА И МОЛИБДЕНА В ГИРОТРОННОМ РАЗРЯДЕ

Приведены результаты исследования цепных плазмохимических процессов, инициируемых импульсным излучением гиротрона в смесях порошков, по составу и по размеру имитирующих лунный реголит, на пластинах тантала и молибдена.

K.G. MOSHKINA ^{1,2}, V.D. BORZOSEKOV ^{1,2},
N.N. SKVORTSOVA ^{1,3}, A. A. SOROKIN ⁴

¹ *Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia*

² *The Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), Moscow, Russia*

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

⁴ *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

SIMULATION EXPERIMENTS ON THE DEPOSITION OF REGOLITH ON TANTALUM AND MOLYBDENUM PLATES IN A GYROTRON DISCHARGE

The results of the study of the chain plasma-chemical processes initiated by pulsed gyrotron radiation in powder mixtures imitating lunar regolith on tantalum and molybdenum plates in composition and size are presented.

Заряженные микрочастицы на Луне обладают повышенными адгезионными способностями, которые в свою очередь оказывают отрицательное воздействие на космические системы, а именно: износ деталей посредством стирания механизмов и загрязнение поверхностей солнечных батарей. Именно поэтому при проектировании космической

техники предназначенной для посадки на Луну важно понимать воздействие реголита (лунной пыли) на конструкционные материалы.

Был проведен ряд экспериментов в плазмохимическом комплексе, при которых СВЧ излучение импульсного гиротрона подавалось на смесь порошков (соответствующих лунному реголиту), над которой помещались металлические пластины. При превышении порога цепных реакций (соответствующей энергии микроволнового импульса 1-3 кДж при мощности гиротрона 200-300 кВт) инициируется взрывной процесс (по механизму кулоновского отталкивания [1]) на поверхность порошка, в результате которого в объем реактора вылетают заряженные частицы.

Заряженные частицы образуют над поверхностью порошка левитирующее облако, которое по химическому составу и размеру соответствуют лунному реголиту. Физико-химические процессы в реакторе и левитация частиц подобны процессам образования облаков лунной пыли при бомбардировке поверхности Луны микрометеорами [2].

На рис.1 показано, что на поверхности тантала и молибдена осаждаются частицы порошка реголита различных размеров и форм. Это позволяет проводить имитационные испытания материалов в данных условиях.

Список литературы

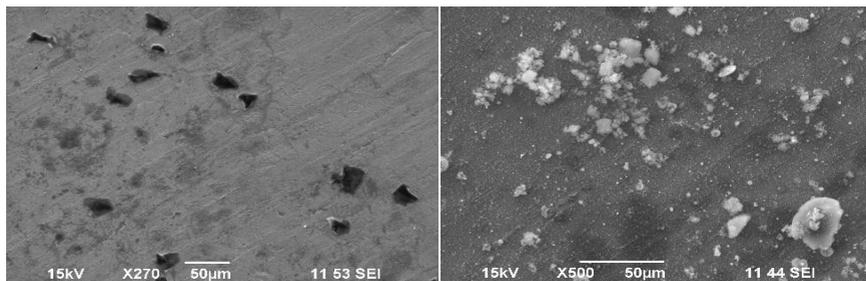


Рис.1. Поверхности тантала (слева) и молибдена (справа) с осажёнными частицами реголита.

1. 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.
2. С. И. Попель, А. П. Голубь, Е. А. Лисин, Ю. Н. Извекова, и др. // Удары высокоскоростных метеороидов и отрыв пылевых частиц от поверхности Луны. Письма в ЖЭТФ 103, 641 (2016).

С.М. МУРОМСКИЙ, А.Е. ЕВСИН, И.Е. КОНДРАТЬЕВ,
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ВЛИЯНИЕ БУФЕРНОГО СЛОЯ FE-CR-AL НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОТОКОМ СВИНЦА

В работе изучалась возможность повышения эффективности защитных покрытий оксида алюминия на стали ЭП-823 за счет нанесения буферного слоя, состоящего из алюминия и компонентов стали, перед формированием покрытия. Показано, что буферный слой препятствует коррозии и окислению стали в потоке свинца при случайном механическом повреждении покрытия. Кроме того, наличие буферного слоя замедляет проникновение железа из стали в покрытие.

S.M. MUROMSKIY, A.E. EVSIN, I.E. KONDRATIEV,
L.B. BEGRAMBEKOV

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

EFFECT OF A BUFFER LAYER FE-CR-AL ON THE EFFICIENCY OF ALUMINUM OXIDE PROTECTIVE COATING IN INTERACTION WITH A LEAD FLOW

In this work, we studied the possibility of increasing the efficiency of aluminum oxide protective coatings on EP-823 steel by applying a buffer layer consisted of aluminum and steel components before the coating deposition. It is shown that the buffer layer prevents corrosion and oxidation of steel in the lead flow in case of accidental mechanical damage of the coating. In addition, the presence of the buffer layer slows down the penetration of iron atoms from steel into the coating.

Стальные оболочки ТВЭЛов реакторов со свинцовым теплоносителем корродируют в потоке свинца (при содержании кислорода в теплоносителе $C_O \sim (10^{-8} - 10^{-7})$ wt.%) и интенсивно окисляются (при $C_O > 10^{-6}$ wt.%). Для их защиты разрабатываются методы нанесения покрытий на основе оксида алюминия. Эти покрытия известны своей стойкостью к коррозии и окислению в потоке свинца и хорошо защищают сталь. Однако их эффективность ограничена отсутствием способности к самовосстановлению при случайных повреждениях. В этой работе изучалась возможность

повышения надежности покрытий оксида алюминия за счет создания буферного слоя, состоящего из Fe, Cr и Al, перед нанесением покрытия.

В качестве образцов использовались четвертные сегменты трубки стали ЭП-823 (диаметр 9.8 мм, толщина стенки 0.5 мм) длиной 8 мм. Буферные слои напылялись в аргоновой плазме разряда с накалимым катодом. В процессе напыления постепенно уменьшался поток распыляемых со стальных мишеней атомов на образец и увеличивался поток атомов Al. Покрытия оксида алюминия напылялись в плазме состава $Ar+7at.\%O_2$ и $Ar+15at.\%O_2$. Толщина покрытий и буферных слоев составляла ≈ 1 мкм.

Образцы испытывались в потоке свинца ($v = 1$ м/с, $T = 600$ °С, $t = 500$ ч) при атмосферном давлении аргона в камере, предварительно откачанной до $P = 10^{-2}$ Торр. До и после испытаний образцы анализировались на электронном микроскопе Tescan Vega 3 с ЭДС-приставкой INCA-xAct.

Эксперименты показали, что сталь без покрытия подверглась значительным коррозионным повреждениям со стороны потока свинца. Содержание кислорода в поверхностной области стали в результате испытаний увеличилось с 2-3 ат.% до 70-75 ат.%, что свидетельствует об окислении стали кислородом, растворенным в расплаве свинца.

Покрытие оксида алюминия, напыленное непосредственно на сталь, в целом проявило стойкость к воздействию свинца. Однако, соотношение Fe/Al в поверхностной области образцов в ходе испытаний увеличилось с 0.1 до 0.7, указывая на проникновение железа из стали в покрытие. Кроме того, на тех участках поверхности, где покрытие было механически повреждено, наблюдались следы коррозии.

Если перед напылением оксида алюминия на сталь наносился буферный слой, то случайное механическое повреждение оксидного покрытия обнажало участок поверхности с буферным слоем, который не корродировал в потоке свинца. Соотношение Fe/Al в поверхностной области этих образцов выросло незначительно (с 0.1 до 0.2), следовательно, буферный слой подавляет диффузию железа из стали в покрытие.

При испытаниях образцов с буферным слоем (без покрытия) содержание кислорода в поверхностной области увеличилось с 3-4 ат.% до 25-26 ат.%, что значительно меньше, чем для стали без покрытия. При этом соотношение Fe/Al в этой области уменьшилось с 4.5 до 3.6.

Был сделан вывод, что при контакте буферного слоя со свинцом, содержащим кислород, на поверхности формируется слой, обогащенный оксидом алюминия, который препятствует дальнейшему оксидированию стали.

Таким образом, буферный слой Fe-Cr-Al способен защитить оболочку ТВЭЛа от коррозии и оксидирования в свинце в случае повреждения покрытия оксида алюминия. Применение защитного покрытия с буферным слоем увеличит ресурс оболочек ТВЭЛов и глубину выгорания топлива.

М.А. КОВТУН, А.В. ПРОКОПЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАЗРАБОТКА МОЩНОГО БАКТЕРИЦИДНОГО РЕЦИРКУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ СВЧ РАЗРЯДА

Предложено использовать СВЧ разряды для получения мощных источников УФ-излучения, которые можно применять для создания мощных бактерицидных рециркуляторов воздуха. Проведена оценка технических характеристик разрабатываемого рециркулятора воздуха. Выполнен расчет и разработана конструкция резонаторной рабочей камеры для поджига и эффективного горения СВЧ разряда в парах ртути.

М.А. KOVTUN, A.V. PROKOPENKO

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

DEVELOPMENT OF POWERFUL BACTERICIDAL MICROWAVE DISCHARGE RECIRCULATOR

It is proposed to use microwave discharges to produce powerful sources of UV radiation, which can be used to create powerful bactericidal air recirculators. The technical characteristics of the developed air recirculator were evaluated. The design of resonator working chamber for ignition and efficient combustion of the microwave discharge in mercury vapor is calculated and developed.

В настоящее время одной из мер профилактики борьбы с вирусами и бактериальными инфекциями является использование бактерицидных УФ рециркуляторов воздуха в местах с большим скоплением людей. Для создания рециркуляторов воздуха традиционно применяют кварцевые электродные разрядные лампы с ртутным заполнением с потребляемой мощностью до 60 Вт и эффективностью преобразования энергии в УФ излучение до 30 %. В работе предлагается использовать для промышленного рециркулятора без электродный микроволновый разряд в парах ртути малого давления с потребляемой СВЧ мощностью до 900 Вт. Выполненные предварительные оценки параметров разрабатываемого прибора показывают, что плотность потока УФ излучения будет на два порядка превосходить используемые разрядные лампы, срок службы без электродной лампы в 2-3 раза больше чем у электродной лампы и объем обрабатываемого помещения также увеличивается на порядок.

Выполнена разработка конструкции промышленного рециркулятора воздуха на основе СВЧ разряда в парах ртути малого давления с

потребляемой СВЧ мощностью до 900 Вт. Предложно использовать в качестве рабочей камеры СВЧ-рециркулятора резонаторной рабочей камеры на основе двухпроводной линии с размещением кварцевой разрядной колбы между её электродами. Численными методами проведен расчет резонаторной рабочей камеры с кварцевой колбой на частоту 2460 МГц со структурой электрических полей соответствующей ТЕМ волне с пятью вариациями электрического поля между электродами двух проводной линии. Собственная добротность резонатора в случае изготовления электродов из меди будет превышать 6000. Проведенные расчеты показывают, что напряженность электрического поля в месте размещения кварцевой колбы будет достигать 1 кВ/см уже при мощности 200 Вт поступающих в резонатор и СВЧ-разряд будет зажигаться в буферном газе (аргон) при давлении 1 мм.рт.ст.

Разработана система СВЧ-питания резонаторной рабочей камеры источника УФ излучения на основе магнетрона LG 2M214 мощностью 900 Вт с источником анодного напряжения трансформаторного типа. Выполнен расчет волноводного узла ввода мощности в резонаторную рабочую камеру на начальный коэффициент связи для волновода сечением 86мм×15мм. Ширина окна ввода мощности располагаемого на торцевой стенке камеры между электродами в начальном режиме пересвязи составит 30 мм. Общая потребляемая от электрической сети мощность СВЧ-системы питания не превысит 1,5 кВт.

В работе определены пути решения ряда инженерных и конструкторских задач. Выполнены оценочные расчеты содержания ртути в без электродной кварцевой колбе связанные с ее тепловым режимом. Определена мощность и конструкция системы продува обеззараживаемого воздуха. Определены ожидаемые технические и эксплуатационные характеристики разрабатываемого прибора. Рассмотрены возможные способы борьбы с образующимся в рециркуляторе озонем. Произведена оценочная калькуляция стоимости изготовления и исследования опытного образца мощного бактерицидного рециркулятора на основе СВЧ-разряда.

Таким образом, разработан проект создания мощного бактерицидного промышленного рециркулятора на основе без электродного микроволновый разряд в парах ртути, оценены его возможные эксплуатационные характеристики и показана техническая возможность создания данного прибора.

К.А. РОГОЗИН¹, М.Н. СОКОЛОВ², В.С. КВАСКОВ¹, С.В.
БЕЛОУСОВ¹, А.А. КОНЬКОВ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, В.П.
БУДАЕВ¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва,

²ФГБОУ ВО ЯрГУ им. Демидова, Ярославль

ПОРТАТИВНЫЙ ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ОБРАБОТКИ БЫТОВЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ

Предложено устройство для обработки бытовых и медицинских поверхностей низкотемпературной плазмой для дезинфекции и активации. Рассмотрено воздействие низкотемпературной плазмы, генерируемой разрядом со скользящей дугой, на различные поверхности. Проведена оценка параметров плазмы, необходимых для активации и дезинфекции различных поверхностей.

К.А. ROGOZIN¹, M.N. SOKOLOV², V.S. KVASKOV¹, S.V.
BELOUSOV¹, A.A. KONKOV¹, S.D. FEDOROVICH¹, V.P.
BUDAEV¹

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
²P. G. Demidov Yaroslavl State University

PORTABLE PLASMA TORCH FOR LOW- TEMPERATURE PLASMA TREATMENT OF HOUSEHOLD AND MEDICAL SURFACES

A device for treating household and medical surfaces with low-temperature plasma for disinfection and activation is proposed. The effect of low-temperature plasma generated by a sliding arc discharge on various surfaces is considered. The plasma parameters required for activation and disinfection of various surfaces were evaluated.

В период пандемии Covid-19 важно уделить особое внимание вопросам дезинфекции окружающих поверхностей для снижения уровня распространения заболеваний. На данный момент известно, что Covid-19 передается воздушно-капельным и контактным путём. Капли содержащие вирусы, осевшие на бытовые поверхности, способны сохранять жизнеспособность ещё длительное время и инфицировать людей в случае прикосновения [1]. Известно, что воздействие низкотемпературной плазмы позволяет активировать [2] и дезинфицировать [3] поверхности обрабатываемых материалов. Совместное действие плазменной активации и дезинфекции

поверхностей позволит получить дезинфицирующие свойства после обработки низкотемпературной плазмой. Кроме того, если считать, что вирусы, передаются капельным путем и выживают только в каплях, то предпочтительно использовать гидрофильные поверхности, на которых капля испаряется быстрее [4]. Такие поверхности могут быть получены при обработке их низкотемпературной плазмой.

В данной работе низкотемпературная плазма генерируется в портативном плазмотроне [5] с разрядом со скользящей дугой [6].

Параметры портативного плазмотрона: напряжение питания 220 вольт, масса 1 кг, напряжение разряда 6 кВ, ток разряда 100 мА, частота 80 кГц, рабочий газ – воздух, скорость потока рабочего газа 3-7.5 м/с. Габариты установки: Источник питания 300x80x100 мм, разрядная камера 190x90x60 мм. Во время обработки возможна инжекция аэрозолей активных веществ, полученных ультразвуковым методом. Инжекция осуществляется на выходе разрядной камеры.

В ходе экспериментов проводилась обработка низкотемпературной плазмой поверхностей различных полимеров (ПВХ, АБС, ПЭТ, алкидный лак). В качестве рабочего газа использовался воздух. Во всех случаях было зафиксировано уменьшение краевого угла смачиваемости. В качестве материалов для исследования взяты полимеры, имеющие большое значение для промышленности и занявшие важное место в быту. Проведен эксперимент по обработке бактерий *e.coli* низкотемпературной плазмой. В качестве рабочего газа использовался воздух и смесь воздуха с аэрозолем пероксида водорода. Показана возможность дезинфекции данным устройством. Исследовано влияние добавления аэрозоля H_2O_2 в плазму, показана эффективность данной методики для дезинфекции поверхностей. Обработка проводилась при скорости воздуха 7.5 м/с.

Список литературы

1. Yixiang Duan, C. Huang, and Q. S. Yu, Rev. of Sci. Instr. 78, 015104 (2007);
2. A.W.H. Chin, J.T.S. Chu, M.R.A. Perera, K.P.Y. Hui, H.-L. Yen, M. C. W. Chan, M. Peiris, and L. L. M. Poon, "Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions," Lancet Microbe 1, e10 (2020);
3. R.A. Wolf, "Atmospheric pressure plasma for surface modification", Scrivener Publishing LLC (2013);
4. Th. von Woedtke et al. / Physics Reports 530 (2013) 291–320;
5. K.A. Rogosin and A.A. Kon'kov 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1370 012037;
6. Swithing Power Supply Design. Second Edition. Abraham I. Pressman. The McGraw-Hill Companies. 1998. 669 p. - 295 c.

В. Ю. САВИН^{1,2}, В. Д. ПУСТОВИТОВ^{1,2}

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

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

КОНВЕРСИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ТОКА ПЛАЗМЫ В КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СРЫВАХ В ТОКАМАКЕ

Анализируется конверсия энергии магнитного поля тока плазмы в кинетическую энергию убегающих электронов (УЭ) во время фазы termination срыва разряда в токамаке. Получены зависимости полного тока плазмы и индуцированного тока в стенке вакуумной камеры от времени при условии экспоненциального спада тока УЭ в рамках нульмерной модели. В рамках 3D-рассмотрения получено уравнение для изменения кинетической энергии УЭ, а также для плоского профиля плотности тока плазмы получена оценка указанной конверсии.

V. Y. SAVIN^{1,2}, V. D. PUSTOVITOV^{1,2}

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

²*National Research Center «Kurchatov institute», Moscow, Russia*

CONVERSION OF THE MAGNETIC ENERGY OF THE PLASMA CURRENT INTO THE KINETIC ENERGY OF RUNAWAY ELECTRONS DURING DISRUPTIONS IN A TOKAMAK

The conversion of the energy of the plasma current magnetic field into the kinetic energy of runaway electrons (RE) during the termination phase of the discharge disruption in the tokamak is analyzed. The dependences of the total plasma current and the induced current in the wall of the vacuum chamber on time have been obtained under the condition of an exponential decay of the RE current in the framework of the zero-dimensional model. Within the framework of the 3D analysis, an equation for the change in the kinetic energy of REs has been obtained, and an estimate of the indicated conversion have been received for the flat profile of the plasma current density.

Одной из многих причин повреждений первой стенки вакуумной камеры токамака при срывах является большой поток тепловой энергии, локально выбрасываемый на стенку убегающими электронами с высокой энергией. Исследования показывают [1, 2], что запасенная убегающими электронами энергия может достигать 100 МДж на

установке ИТЕР, причем площадь поверхности стенки камеры, на которой может выделяться эта энергия, достаточно мала. Условия установления режима, при котором электроны аккумулируют столь большую энергию, на данный момент изучены неполно [1-3]. Неясным остается влияние резистивности стенки вакуумной камеры на долю указанной выше конверсии, что и исследуется в данной работе.

Следуя работе [2], на основе нульмерной модели исследуется эволюция полного тока плазмы и тока, генерируемого в стенке камеры токамака, при экспоненциальном спаде тока УЭ путем аналитического решения уравнений для указанных токов, получаемых из закона Фарадея, с учетом закона Ома

$$(1) \quad \frac{d}{dt}(L_p I_p + M I_w) = -2\pi R_0 E,$$

$$(2) \quad \frac{d}{dt}(M I_p + L_w I_w) = -I_w R_w,$$

$$(3) \quad E = \frac{\eta}{\pi a^2}(I_p - I_{RE}).$$

Здесь L_p и M – соответственно индуктивность плазмы и взаимная индуктивность плазмы и стенки, I_p , I_{RE} и I_w – соответственно ток плазмы, ток УЭ и ток в стенке камеры, E – напряженность электрического поля в плазме, R_0 и a – большой и малый радиусы токамака, L_w и R_w – индуктивность и сопротивление камеры, η – резистивность плазмы.

Затем, используя формулу из работы [2] для энергии, конвертируемой в кинетическую энергию УЭ, оценивается доля обозначенной конверсии.

Далее, в рамках 3D-рассмотрения было получено соотношение для изменения кинетической энергии убегающих электронов за счёт конверсии энергии магнитного поля и приведена оценка для доли конверсии

$$(4) \quad \frac{\Delta W_{RE}}{W_{mag}^0} = \frac{1}{4\alpha(1+\pi R_0 E_r / R_{pl} I_0)}.$$

Здесь ΔW_{RE} – изменение кинетической энергии УЭ, W_{mag}^0 – энергия полоидального магнитного поля до срыва, R_{pl} – сопротивление плазмы, I_0 – ток УЭ до срыва, E_r – критическое электрическое поле, которое должны преодолеть УЭ для ускорения [4, 5], а параметр α равен

отношению резистивного времени плазмы к характерному времени спада тока УЭ при срыве.

Список литературы

1. J. Riemann, H. M. Smith, and P. Helander, Phys. Plasmas, vol. 19, no. 1, 2012.
2. J. R. Martín-Solís, A. Loarte, E. M. Hollmann, B. Esposito, and V. Riccardo, Nucl. Fusion, vol. 54, no. 8, 2014.
3. A. J. Dai et al., Plasma Phys. Control. Fusion, vol. 60, no. 5, 2018.
4. S. A. Bozhenkov et al., Plasma Phys. Control. Fusion, vol. 50, no. 10, 2008.
5. B. N. Breizman, P. Aleynikov, E. M. Hollmann, and M. Lehnen, Nucl. Fusion, vol. 59, no. 8, 2019.

А.В. САНДОМИРСКИЙ, А.А. ЛИЗУНОВ
*Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет, Новосибирск, Россия*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕЗАРЯДНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ ПЛАЗМЫ В ЛИНЕЙНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Измерение функции распределения ионов плазмы в линейных магнитных ловушках важно для изучения процессов продольного переноса частиц и энергии. Именно уменьшение продольных потерь является критическим условием осуществления УТС в открытой магнитной ловушке. В данной работе был использован спектроскопический метод, основанный на перезарядки ионов плазмы на пучке инжектируемых атомов, представляющем собой искусственную мишень. Этот метод обладает рядом преимуществ по сравнению с альтернативными.

A.V. SANDOMIRSKY, A.A. LIZUNOV
*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
Budker Institute of Nuclear Physics SBRAS*

APPLICATION OF CHARGE EXCHANGE SPECTROSCOPY METHOD TO MEASURE OF DISTRIBUTION FUNCTION OF PLASMA IONS IN A LINEAR MAGNETIC TRAP

Measurement of the distribution function of plasma ions in linear magnetic traps is important for studying the processes of axial transport of particles and energy. The decrease in longitudinal losses is the critical condition for the implementation of the fusion power in an open magnetic trap. In this work the spectroscopic method was used which based on the charge exchange of plasma ions on an artificial target (in a stream of injected atoms). This method has several advantages over alternative ones.

Эксперименты проводились в газодинамической ловушке (ГДЛ) [1], которая представляет собой линейную систему для удержания плазмы с аксиально-симметричной конфигурацией магнитного поля. При создании и нагреве плазмы в ГДЛ, формируется положительный электростатический потенциал, называемый амбиполярным, спадающий вдоль каждой силовой линии от максимума в центре до нуля на стенке. Такой потенциал определяется квазинейтральностью плазмы в каждой точке, а также равенством продольных токов электронов и ионов на торцевую стенку. Потенциал формирует барьер

для покидающих ловушку электронов, а также ускоряет ионы, вытекающие в потоке плазмы через магнитную пробку.

В основе метода диагностики использовался эффект Доплера, основанный на изменении регистрируемой длины волны вследствие движения источника излучения относительно детектора. Чтобы конвертировать ускоренные ионы плазмы в возбуждённые атомы с последующим излучением света, использовалась водородная газовая мишень. Излучение при перезарядке на мишени собиралось оптической системой, поступало в спектрометр схемы Черни-Тёрнера с дифракционной решёткой и регистрировалось быстродействующей ПЗС-камерой. Перед измерениями в плазме ГДИ была произведена калибровка спектральной дисперсии и аппаратной функции прибора при помощи лабораторных газоразрядных ламп H и He.

В данной работе получены первые результаты применения метода перезарядной спектроскопии (CXRS) для измерения функции распределения ионов плазмы по скорости. Представлены экспериментальные спектры излучения линий H- α (656.28 нм) и He-I (667.8 нм). Проведена оптимизация газовой мишени, показаны оценки амплитудного контраста и достигаемого в измерениях пространственного разрешения.

Список литературы

1. Иванов А. А., Приходько В. В. Газодинамическая ловушка: обзор концепции и экспериментальных результатов // Физика плазмы и управляемый синтез. – 2013. – Т. 55. – №. 6. – С. 063001.

Р.А. СЕЛИВАНОВ¹, И.А. СОРОКИН^{1,2}

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва*

²*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.
Котельникова РАН, Фрязино Московской обл.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПУЧКОВО- ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА УСТАНОВКЕ ПР-2

Определен диапазон основных параметров пучково-плазменного разряда на линейном симуляторе ПР-2 для различных газов (водород, гелий и аргон), рабочих давлений (от 0.01 до 1 Па) и настроек электронной пушки. Также рассмотрено влияние подачи потенциала смещения на приемную пластину электронного пучка на параметры плазмы. Оценен поток тепловой мощности, на поверхность приемной пластины.

R.A. SELIVANOV¹, I.A.SOROKIN^{1,2}

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

²*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics Fryazino branch.
Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia*

INVESTIGATION OF BEAM-PLASMA DISCHARGE PARAMETERS AT THE PR-2 FACILITY

We determine the range of the main parameters of the beam-plasma discharge at the linear device PR-2 for various gases (hydrogen, helium and argon), operating pressures (from 0.01 to 1 Pa) and settings of the electron gun. The effect of bias potential to the electron beam receiving plate on the plasma parameters is considered. The flow of thermal power to the receiving plate surface is estimated.

При разработке термоядерных установок актуальной остается проблема разрушения первой стенки под действием тепловых, плазменных и нейтронных потоков. Существующие углеродные композитные или металлические модели обращенных к плазме деталей обладают рядом недостатков, связанных с проходящими на поверхности физико-химическими процессами и влияющих на параметры плазмы в целом. Сейчас ведутся исследования кандидатных материалов первой стенки существующих или строящихся проектов, например, вольфрама [1]. Также разрабатываются различные функциональные материалы, способные уменьшить влияние тепловых и плазменных потоков на целостность элементов первой стенки, например, «умные сплавы» [2-3] (в случае металлической стенки) или

различные капиллярно-пористые системы, в том числе композитные материалы [4] (в случае жидкой стенки).

Для проведения подобных исследований необходимо создавать близкие к условиям первой стенки ТЯУ тепловые и плазменные потоки на поверхность кандидатных материалов. Достаточно универсальным источником как тепловых, так и плазменных потоков является пучково-плазменный разряд (ППР) [5-6], инициируемый мощным электронным пучком. Варьирование рабочего давления и параметров электронной пушки в данном случае позволяет получать плазму в широком диапазоне параметров (электронная температура – до 20 эВ, плотность – до 10^{19} м^{-3} для водорода) от редкой пучковой плазмы (ионизация электронным ударом) до ППР, когда значительную роль в ионизации газа играют коллективные процессы взаимодействия различных электронных компонентов. Также наличие высокоэнергетичной электронной компоненты в плазме ППР позволяет варьировать тепловой поток на поверхность исследуемых образцов в процессе облучения путем увеличения энергии первичного пучка без значительного изменения параметров плазмы (на формирование разряда первичный электронный пучок теряет до 25-30% энергии). Стоит отметить, что в вакуумном режиме транспортировки наличие электронной пушки позволяет проводить отдельно тепловые, в том числе циклические, испытания.

В работе получена карта локальных параметров плазмы пучково-плазменного разряда на установке ПР-2. Измерения проводились с помощью одиночного зонда Ленгмюра для различных газов (водород, гелий и аргон), значений рабочего давления (от 0.01 до 1 Па) и настроек электронной пушки (ускоряющего потенциала и тока эмиссии). Проведена оценка выделяемой на поверхности образца тепловой мощности, а также исследовано влияние подачи потенциала смещения коллектора электронного пучка (держателя образцов) на параметры плазмы.

Список литературы

1. Ialovega M., Bernard E., Bisson R., et al // Physica Scripta. 2020. 2020(T171) DOI:10.1088/1402-4896/ab68bd.
2. Litnovsky A., Schmitz J., Klein F., et al // Fusion Engineering and Design. 2020. 159. 111742. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.111742
3. Klein F., Litnovsky A., Tan X., et al // Fusion Engineering and Design. 2021. 166. 112272. DOI:10.1016/j.fusengdes.2021.112272

4. Suwarno S., Ngene P., Nale A., et al // Journal of Physical Chemistry C. Vol. 121. № 8, P. 4197–4205. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b13094.
5. Gutorov K.M., Vizgalov I.V., Sorokin I.A., Podolyako F.S. // Journal of Surface Investigation. 2016. Vol. 10. No. 3. P. 612–616.
6. Kurnaev V., Vizgalov I., Gutorov K., et al // Journal of Nuclear Materials. 2015. Vol. 463. P. 228-232.

Н.С. СЕРГЕЕВ^{1,2}, А.В. КАЗИЕВ², Ю.М. ГАСПАРЯН²

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПРИМЕСИ ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕ ИНДУКЦИОННОГО ВЧ-РАЗРЯДА

В работе рассмотрено изменение уровня сигнала интенсивности спектральных линий водорода серии Бальмера ($n' = 2$ и $n = 3, 4, 5$) при изменении процентного содержания примеси водорода в гелиевой/аргоновой плазме индукционного ВЧ-разряда. Проведена оценка чувствительности спектроскопического метода детектирования примеси водорода в видимом диапазоне длин волн. Предложены способы повышения чувствительности измерений данным методом с целью проведения измерений методом лазерной эмиссионной спектроскопии в плазме ВЧИ разряда.

N.S. SERGEEV^{1,2}, A.V. KAZIEV², Y.M. GASPARYAN²

¹National Research Center "Kurchatov Institute" (NRC KI), Moscow, Russia

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

SENSITIVITY OF MEASUREMENTS OF HYDROGEN IMPURITY SPECTRA IN ICP PLASMA DISCHARGE

In this work, the change of the spectral lines ratio of the H impurity radiation and He/Ar plasma emission spectrum of the ICP discharge is studied. In order to do so, the measurements of Balmer series lines intensities ($n' = 2$ и $n = 3, 4, 5$) are considered. The measurements were carried out with a different impurity to working gas percentage ratio. Methods for increasing the sensitivity of LIBS measurements in the ICP plasma discharge are proposed.

Плазма высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда является универсальным инструментом по исследованию процессов эрозии и модификации поверхности [1]. В системах, где он используется, возможно гибкое регулирование значений основных параметров плазмы, таких как электронная температура, T_e , и электронная плотность, n_e . Это позволяет подбирать необходимые условия для воздействия плазмы на поверхность: упрочнения приповерхностного слоя, увеличения шероховатости и создания особых структур на поверхности [2].

Благодаря широкому диапазону рабочих параметров и способности поддерживать разряд при высоких давлениях $p_g > 10$ Па, ВЧИ-разряд рассматривается в качестве инструмента по исследованию приповерхностных процессов при воздействии лазерного излучения в ЛИС измерениях. ВЧИ-разряд, создаваемый в условиях повышенного давления, позволяет значительно увеличить время жизни плазмы искрового разряда и свечения возбужденных частиц материала, создаваемых в процессах лазерной абляции.

В данной работе анализируется изменение уровня интенсивности спектральных линий примеси водорода серии Бальмера ($n' = 2$ и $n = 3, 4, 5$) при изменении процентного содержания примеси водорода в гелиевой/аргоновой плазме индукционного ВЧ-разряда в новой компактной установке “MinICP”. Частота генерируемого излучения 13,56 МГц. Одновременно с регистрацией оптического излучения плазмы (рис. 1) производились зондовые измерения параметров плазмы.

Проведена оценка чувствительности спектроскопического метода детектирования примеси водорода в видимом диапазоне длин волн в плазме ВЧИ-разряда. Предложены способы повышения чувствительности измерений данным методом с целью проведения измерений методом лазерной эмиссионной спектроскопии в плазме ВЧИ разряда.

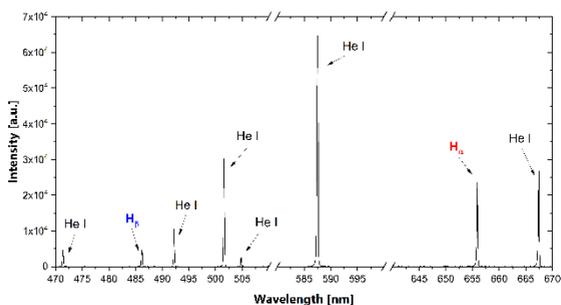


Рис. 1. Данные спектроскопических измерений в видимом диапазоне длин волн для случая Н/He смеси газов.

Список литературы

1. Hyo-Chang Lee. Review of inductively coupled plasmas: Nano-applications and bistable hysteresis physics // Applied Physics Reviews 5, 011108 (2018);
2. Kharkov M.M et al. Effects of Ar ion irradiation in an ICP discharge on the titanium surface topology // Applied Surface Science, 2020, 527, 146902;

Д.С. СТЕПАНОВ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В СВЧ ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ

Рассмотрена кинетическая модель СВЧ разряда с электронно-циклотронным резонансом, учитывающая эволюцию ФР электронов. Показано существование критических значений электрического и магнитного полей, превышение которых приводит к резкому «убеганию» электронов. Объяснена экспериментально наблюдаемая зависимость плотности ионного тока СВЧ источника от распределения магнитного поля.

D.S. STEPANOV, E.Y. SHKOLNIKOV

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

OPTIMAL PARAMETERS OF THE ELECTRONIC-CYCLOTRON RESONANCE IN THE MICROWAVE ION SOURCE

A kinetic model of a microwave discharge with the electron-cyclotron resonance is considered, taking into account the evolution of the DF of electrons. The existence of critical values of the electric and magnetic fields, the excess of which leads to a sharp "runaway" of electrons, is shown. Experimentally observed dependence of the microwave source ion current density on the distribution of the magnetic field explained.

Источники ионов на базе СВЧ разряда в режиме электронно-циклотронного резонанса активно исследуются на протяжении последних десятилетий. В этой связи представляют интерес работы, посвященные анализу процессов в СВЧ плазме и их влиянию на работу ионных источников. Ранее, авторами [1] была создана программа для моделирования кинетики газоразрядной плазмы, учитывающая эволюцию ФР электронов. В настоящей работе данная программа была применена к СВЧ разряду в режиме ЭЦР ионного источника портативного нейтронного генератора [2] с целью выявления оптимальных условий образования СВЧ плазмы.

Динамика поглощения СВЧ энергии плазмой определяется величиной $E_0^2\gamma$ (E_0 – напряженность электрического поля, γ – коэффициент резонансного усиления [1]). Анализ результатов моделирования разряда при различных значениях $E_0^2\gamma$ показал, что

данная величина должна находиться в диапазоне от 10^9 до 10^{11} В²/м² (оптимально – в окрестности $4 \cdot 10^{10}$ В²/м²). При меньших значениях нагрев электронов незначителен, а при большем – они резко переходят в режим «убегания». Важно заметить, что при аналогичных расчетах, но использующих Максвелловскую ФР электронов верхняя граница указанного диапазона не носит резкого характера и превышает значение 10^{13} В²/м². В работе [2] представлено исследование влияния распределений магнитного поля в СВЧ источнике ионов на плотность извлекаемого тока. На рис. 1 показаны отвечающие каждому значению тока (распределению магнитного поля) распределения величины $E_0^2 \gamma$.

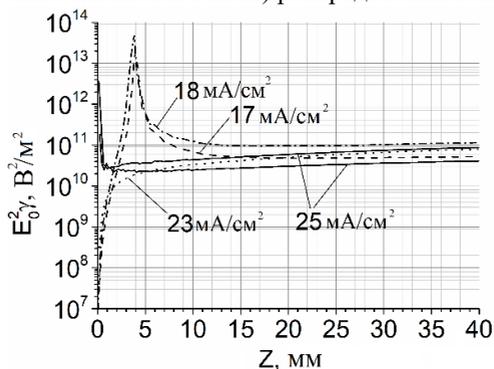


Рис. 1. Распределение величины $E_0^2 \gamma$ для ионного источника из [2].

Наибольшие плотности тока достигаются для распределений магнитного поля, находящихся близко к оптимальному значению в $4 \cdot 10^{10}$ В²/м², причем это верно для всей длины резонатора. Обратная картина имеет место для распределений магнитного поля, где ЭЦР выполняется внутри источника, в результате чего на 25% его длины величина $E_0^2 \gamma$ выходит за пределы рабочего диапазона, а значит появляются «убегающие» электроны и ионный ток спадает.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90033.

Список литературы

1. Степанов Д.С., Школьников Э.Я. Разработка кинетической модели плазмы СВЧ-разряда в режиме электронно-циклотронного резонанса с учетом временной эволюции функции распределения электронов // Теплофизика высоких температур. 2021. Т.59, №1, с. 1-10.
2. Waldmann O. Development of a Permanent-Magnet Microwave Ion Source for a Sealed-Tube Neutron Generator // PAC 11 2011 Particle Accelerator Conference, LBNL Paper LBNL-4641E.

А.Б. ТАЖЕН, М.К. ДОСБОЛАЕВ, Т.С. РАМАЗАНОВ
*Научно-исследовательский институт экспериментальной
и теоретической физики, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

В этой работе представлены результаты диагностики импульсной плазмы с помощью высокочастотного магнитного зонда. Магнитный зонд представляет собой измерительную катушку, состоящую из 7 витков. Диаметр катушки 2,3 мм, индуктивность равен 0,113 $\mu\text{Гн}$, временное разрешение составляет 2,3 нс.

A.B. TAZHEN, M.K. DOSBOLAYEV, T.S. RAMAZANOV
Institute of Experimental and Theoretical Physics, KazNU, Almaty, Kazakhstan

STUDY OF THE MAGNETIC FIELD OF A PLASMA FLOW IN A PULSED PLASMA ACCELERATOR

This work presents the results of pulsed plasma diagnostics using a high-frequency magnetic probe. The magnetic probe is measuring coil, which has a 7 turn. The coil diameter is 2,3 mm, coil inductance is 0,113 μH and a temporal resolution time is 2,3 ns.

Коаксиальные плазменные ускорители используются в качестве реактивных двигателей, в качестве установок для обработки материалов различного рода, в термоядерной энергетике для экспериментального моделирования влияния радиационной и тепловой нагрузки на первую стенку ТЯЭР, обращенных к плазме [1-4]. Одним из важных свойств плазмы является собственное магнитное поле, создаваемое пучком заряженных частиц. Самыми распространенными методами измерения магнитного поля в плазме являются спектроскопия и лазерная диагностика. Однако эти методы достаточно сложны в реализации. В этой работе нами был использован магнитный зонд, с временным разрешением 2,3 нс, рассчитанную по $\tau = L/R_0$, где L – индуктивность зонда (0,113 $\mu\text{Гн}$), R_0 – сопротивление коаксиального кабеля.

Зонд помещался внутри вакуумной камеры на расстоянии 6 см от системы электродов и подключался к осциллографу LeCroy 354A, 500МГц через интегратор. Для измерения скорости плазменного потока использовались два магнитных зонда с одинаковыми параметрами. В этом случае второй зонд располагался на расстоянии 17,5 см от первого зонда. Скорость плазменного потока находится измерением разницы времени (Δt) осциллограмм от двух зондов.

Эксперименты проводились при различных величинах напряжений на конденсаторных батареях и давлений газа в вакуумной камере. Таким образом, полученные результаты показаны на рисунках 1 и 2.

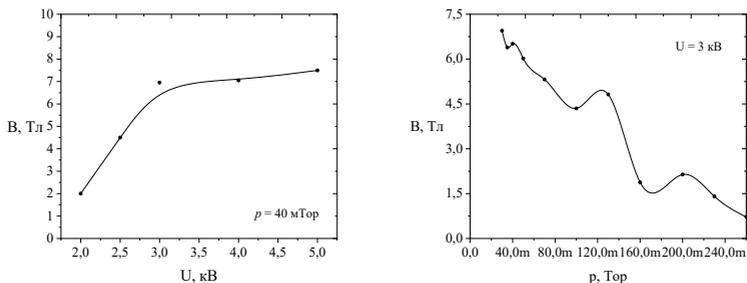


Рис. 1. Зависимость величины собственного магнитного поля плазменного потока от напряжения на конденсаторах и давления газа

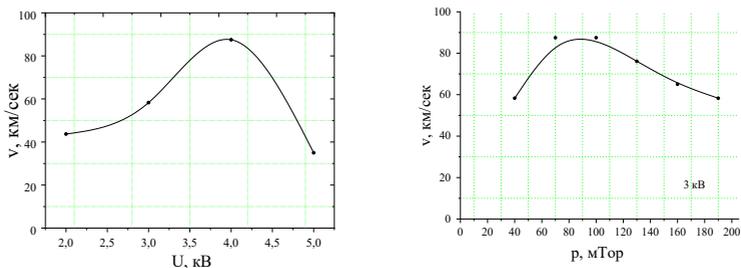


Рис. 2. Зависимость скорости плазменного потока от напряжения на конденсаторах и давления газа

Список литературы

1. Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh.R., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. // IEEE Transaction on plasma science. 2019. № 7, P. 3047–3051.
2. Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. // Laser and Particle Beams. 2017. Vol. 35, № 4, P. 741–749.
3. Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. // Acta Physica Polonica A. 2019. Vol. 136, № 2, P. 348–350.
4. Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh.R., Ramazanov T.S. // Plasma Physics Reports. 2020. Vol. 46, № 4, P. 465–471.

УДК 533.9.08

Г.П. ТИМКОВСКИЙ, А.Е. ЕВСИН, И.Е. КОНДРАТЬЕВ,
С.С. ДОВГАНЮК, И.Д. ЖДАНОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ОКСИДИРОВАНИЕ И НАВОДОРОЖИВАНИЕ ЦИРКОНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ И ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

В работе изучаются особенности оксидирования и наводороживания циркония при облучении электронами и плазмой в различных условиях. Показано, что под действием облучения происходит ускорение оксидирования и захвата водорода в цирконий. Максимальные скорости обоих процессов при сохранении их характера как в автоклавных испытаниях достигаются при плазменном анодировании, что обуславливает его выбор в качестве метода ускоренного тестирования сплавов Zr.

G.P. TIMKOVSKIY, A.E. EVSIN, I.E. KONDRATIEV,
S.S. DOVGANYUK, I.D. ZHDANOV, L.B. BEGRAMBEKOV
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

OXIDATION AND HYDROGENATION OF ZIRCONIUM UNDER ELECTRON AND PLASMA IRRADIATION IN VARIOUS CONDITIONS

The features of oxidation and hydrogenation of zirconium is studied under electron and plasma irradiation in various conditions. It is shown that under irradiation, the oxide growth and the hydrogen trapping in zirconium is accelerated. The maximum rates of both processes, while maintaining their character as in autoclave tests, are achieved with plasma anodizing, which determines its choice as an accelerated test of Zr alloys.

Дореакторные коррозионные испытания циркониевых сплавов, заключающиеся в выдержке образцов в водных автоклавах, занимают тысячи часов, что существенно затягивает процесс усовершенствования нынешних и создания новых сплавов. Ранее было показано, что скорость роста оксидного слоя на цирконии можно увеличить, если облучать его в плазме, содержащей кислород или пары воды. Вместе с тем, оптимальный режим облучения, обеспечивающий быстрое оксидирование и наводороживание циркония при сохранении характера протекания этих процессов как в автоклавных испытаниях, пока не определен. Целью данной работы было изучить особенности

оксидирования и наводороживания циркония при облучении электронами и плазмой в различных условиях.

Первая серия образцов (сегментов трубки сплава Э110 размером $\approx 7 \times 8 \times 1$ мм³) облучалась электронами ($E = 400$ эВ, $i = 0.4$ мА) в газовой среде Ar + 20% O₂ ($P = 10^{-3}$ Торр). Вторая серия облучалась в плазме того же состава при плавающем потенциале, а третья – электронами ($E \approx 20$ эВ, $i \approx 4$ мА) плазмы при анодном потенциале. Для сравнения часть образцов выдерживалась в той же газовой среде без облучения. Эксперименты проводились при температуре образцов 380 °С в течение 60-600 мин. Коррозионный привес вычислялся по разности масс образца до и после эксперимента. Количество водорода в образцах и характер его удержания определялись методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС).

В результате экспериментов было установлено, что кинетика оксидирования циркония в газовой среде и в плазме является параболической ($\Delta m \sim t^{1/2}$), как и при автоклавных испытаниях. При этом скорость роста оксидного слоя при плазменном облучении возрастает в 10 раз (при плавающем потенциале) и в 30 раз (при анодном потенциале), по сравнению с выдержкой в газе. При облучении циркония электронами в газовой среде закон и скорость роста оксидного слоя вначале такие же, как при выдержке в газе, однако по достижении привеса ≈ 5 мг/дм² происходит резкое ускорение оксидирования по линейному закону.

Согласно результатам ТДС-анализа, электронное и плазменное облучение вызывает захват водорода в цирконий, по-видимому, из молекул воды, являющихся основным компонентом остаточного газа установки. Наибольшее количество водорода ($\approx 1.3 \times 10^{19}$ см⁻³) захватывается в образец при облучении электронами плазмы.

Анализ ТДС-спектров водорода показал, что их форма зависит от скорости оксидирования циркония. При низкой скорости оксидирования, демонстрируемой при выдержке образцов в газе, электронном облучении в газе и плазменном облучении при плавающем потенциале, в ТДС-спектре, помимо основного пика при 1300 К, появляется низкотемпературная часть в диапазоне 1000-1200 К. При быстром оксидировании циркония, достигаемом при облучении электронами плазмы, в ТДС-спектре присутствует единственный максимум, который в процессе роста оксида сдвигается с 1300 К в

высокотемпературную область. Аналогичная эволюция ТДС-спектров наблюдалась при автоклавных испытаниях.

Таким образом, при облучении электронами плазмы достигаются максимальные скорости оксидирования и наводороживания циркония, а характер протекания этих процессов аналогичен автоклавным испытаниям. В связи с этим плазменное анодирование представляется наиболее подходящим способом ускоренного тестирования циркониевых сплавов.

Д. Л. УЛАСЕВИЧ, Р. Р. ХАЙРУТДИНОВ, В. Э. ЛУКАШ, А. С.
ПРИШВИЦЫН, Н. Е. ЕФИМОВ, А. И. АЛИЕВА, С. А. КРАТ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА МИФИСТ-0

Было произведено моделирование равновесных конфигураций плазмы токамака МИФИСТ-0 с обновленной полоидальной магнитной системой, в частности, с учетом «трансформаторной» ее части, отвечающей за уравнивание магнитного поля от центрального соленоида. Были проведены калибровочные эксперименты без учета вакуумной камеры с использованием импульсного источника тока, на основании результатов которых сформулирована динамическая задача расчета плазменного равновесия. Проведено сравнение результатов моделирования с данными экспериментов и рассмотрено влияние камеры на получаемые результаты.

D. L. ULASEVICH, R. R. KHAYRUTDINOV, V. E. LUKASH
A. S. PRISHVITSYN, N. E. EFIMOV, A. I. ALIYEVA, S. A.
KRAT

*MEPHI National Nuclear Research University, Moscow, Russia
Kurchatov Institute, Moscow, Russia*

STUDY OF EQUILIBRIUM CONFIGURATIONS IN PLASMA OF MEPHIST-0 TOKAMAK

The equilibrium configurations of the MIFIST-0 tokamak plasma were simulated with an updated polyoidal magnetic system, in particular, considering the "transformer" part of it, responsible for balancing the magnetic field from the central solenoid. Calibration experiments were conducted without considering the vacuum chamber using a pulsed current source, based on which the dynamic task of calculating plasma equilibrium was formulated. The results of the simulation with the experiment data were compared and the camera's effect on the results was examined.

Анализ равновесных плазменных конфигураций в токамаке позволяет определить необходимые для их формирования параметры источников питания полоидальной магнитной системы. Решая динамическую задачу, можно рассматривать эволюцию плазмы в течение всего сценария разряда с перспективой создания активной системы управления положением плазменного шнура. На данный момент решались задачи формирования стационарной и динамической плазменных моделей, а также их калибровка по результатам

экспериментальным данным. Для решения данных задач использовался верифицированный на действующих установках код DINA [1].

Равновесные плазменные конфигурации токамака МИФИСТ-0 рассчитывались для момента пробоя при токе плазмы $I_{PL}=10$ кА. Расчеты показывают, что необходимая сила тока в полоидальных катушках при их последовательном соединении не превышает 1.5 кА. Также расчет показывает наличие “нуля” магнитного поля в центральной области вакуумного объема токамака. Данные расчеты получены при помощи модуля DINA-SVD [2].

В целях калибровки модели была сформулирована динамическая задача формирования магнитных силовых линий без плазмы и проведено сравнение численных результатов с экспериментально полученными данными. Использовалась SIMULINK модель, применяемая для решения аналогичных задач на токамаке Т-15 [3]. В экспериментах использовался импульсный источник тока, батарея конденсаторов, датчики Холла для определения магнитного поля на оси и пояс Роговского для определения тока в полоидальных катушках. Далее была создана модель объекта, включающая указанные выше элементы установки, а также вакуумную камеру.

В целях калибровки проводилась подача тока на каждую из катушек по отдельности и последующее сравнение данных с результатами моделирования. Далее была смоделирована конфигурация с подключением всех катушек и индуктора, выбранная для реализации плазменных равновесий на токамаке. Решение задачи с учетом источников питания обмоток показал возможность использования рассматриваемой полоидальной системы для получения равновесных плазменных конфигураций с заданными параметрами. Также было показано, что добавление вакуумной камеры вносит в вид импульса только временную поправку, что также подтверждено экспериментом.

Список литературы

1. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — J. Comput. Physics, 1993, vol. 109, p. 193—201.
2. Р.Р. Хайрутдинов, В. Э. Лукаш. Программа расчета МГД-равновесия плазмы в токамаке DINA-SVD -- Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 3, с. 87—89.
3. В.Н. Докука, А.А. Кавин, В.Э. Лукаш, М.М. Соколов, Р.Р. Хайрутдинов, В.А. Хайрутдинова, Численное моделирование управления плазмой в модернизированном токамаке Т-15, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 3

М.М. ХАРЬКОВ¹, Г.И. РЫКУНОВ¹, А.В. КАЗИЕВ¹,
М.С. КУКУШКИНА¹, М.В. ПРОЖЕГА², Е.О. РЕЩИКОВ²,
И.С. БАБИНЕЦ^{2,3}, П.П. БЕСШАПОВ^{2,3}, А.М. СТАСЕНКО^{2,3},
С.В. ЧЕРНЫШОВ^{2,3}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова

³Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

АНАЛИЗ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА ПРИ ОСАЖДЕНИИ ПЛЕНОК MoS₂

Рассмотрены среднечастотные и DC режимы магнетронного осаждения покрытий из спеченной мишени MoS₂. Проведена масс-спектрометрия ионного потока и зондовая диагностика плазмы, измерены скорости и толщины пленок в зависимости от режима осаждения и потенциала смещения.

М.М. KHARKOV¹, G.I. RYKUNOV¹, A.V. KAZIEV¹,
M.S. KUKUSHKINA¹, M.V. PROZHEGA², E.O. RESCHIKOV²,
I.S. BABINETS^{2,3}, P.P. BESCHAPOV^{2,3}, A.M. STASENKO^{2,3},
S.V. CHERNYSHOV^{2,3}

¹National Research Nuclear University MEPHI

²Blagonravov Institute of Machine Science

³Bauman Moscow State Technical University

MAGNETRON DISCHARGE PLASMA CHARACTERIZATION IN THE PROCESS OF MoS₂ DEPOSITION

Mid-frequency and direct current modes of magnetron sputtering from a sintered MoS₂ target have been investigated. Mass-spectrometry study of ion flux and probe diagnostics of plasma have been carried out. Deposition rate and coating thickness have been measured for different operation modes and bias voltage values.

Покрyтия из дисульфида молибдена применяются в качестве твердой смазки для работы в вакууме и сухой среде. Также такое покрытие используется для предотвращения спекания деталей, испытывающих большие термические нагрузки, например, крепежных деталей элементов первой стенки токамаков [1]. Адгезивные свойства покрытий, в первую очередь, определяются подготовкой поверхности и режимом осаждения.

В работе изучалась плазма магнетронного разряда, работающего как в среднечастотном режиме при частоте $f = 1-100$ кГц, так и в режиме постоянного тока (DC), с мощностью $P_d = 10-20$ Вт при давлении рабочего газа аргона $p_{Ar} = 0,5$ Па. Концентрация и температура

электронов измерялись зондовым методом. Состав ионного потока из плазмы на подложку измерялся специализированным масс-анализатором [2]. Проведено несколько пробных осаждений покрытия MoS_2 в частотном и DC режимах при подаче напряжения смещения разной полярности. Наилучшей адгезией обладают покрытия, осажденные в режиме DC. Затем, в ходе измерений толщины покрытий было обнаружено, что подача положительного напряжения смещения (+100 В) приводит к увеличению скорости роста пленки на $\sim 30\%$ относительно скорости осаждения при подаче небольшого отрицательного смещения (-20 В).

Проведены трибологические испытания покрытий дисульфида молибдена, осажденных на сталь AISI316L. Испытания производились в вакууме, при температуре 250°C , индентором с радиусом 3 мм.

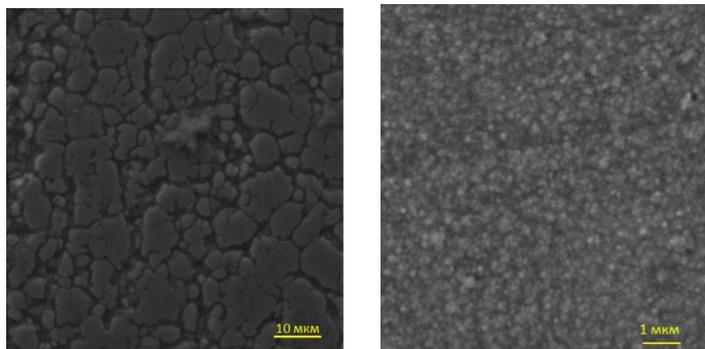


Рис. 1. Исходная структура поверхности AISI316L (слева), структура покрытия MoS_2 (справа).

Список литературы

1. V. Thompson, R. Eaton, R. Raffray, K. Egorov, Properties of low friction anti-seize coatings for fusion applications // Fusion Engineering and Design 146 (2019) 345–348
2. D.V. Kolodko D.V., D.G. Ageychenkov, A.V. Kaziev, K.A. Leonova, M.M. Kharkov, A.V. Tumarkin, Diagnostics of ion fluxes in low-temperature laboratory and industrial plasmas // Journal of Instrumentation 14 (2019) P10005

А.К. ХОМЯКОВ, С.А. КРАТ, А.С. ПРИШВИЦЫН, Е.А.
ФЕФЁЛОВА, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ И ДЕСОРБЦИЮ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ СООСАЖДЕННЫХ ЛИТИЕВЫХ СЛОЕВ

Рассмотрено влияние облучения ультрафиолетовым излучением соосажденных литиевых слоев на содержание и десорбцию дейтерия из них. Установлено, что воздействие ультрафиолета подавляет десорбцию при высоких температурах, облегчает десорбцию при низких температурах. Рассмотрены эффекты, которые могут лечь в основу создания методик определения мест накопления гидрида лития в токамаках с литиевыми стенками, а также удаления тяжелых изотопов водорода из стенок установок при достаточно низких температурах.

A.K. HOMIAKOV, S.A. KRAT, A.S. PRISHVITSYN, E.A.
FEFELOVA, Y.M. GASPARYAN, A.A. PISAREV
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

THE INFLUENCE OF ULTRAVIOLET RADIATION ON THE CONTENT AND DESORPTION OF DEUTERIUM FROM CO- DEPOSITED LITHIUM FILMS

The influence of ultraviolet irradiation of co-deposited lithium layers on the content and desorption of deuterium from them is considered. It was found that exposure to ultraviolet radiation suppresses desorption at high temperatures, facilitates desorption at low temperatures. The effects are considered which can form the basis for the creation of methods for determining the places of accumulation of lithium hydride in tokamaks with lithium walls, as well as for removing heavy hydrogen isotopes from the walls of installations at sufficiently low temperatures.

Переосаждение трития с распыленным плазмой материалом стенки является одним из основных способов накопления радиоактивного изотопа водорода трития в термоядерных установках. В токамаках, в которых планируется использование жидкого лития в качестве материала стенки, проблема накопления изотопов водорода имеет особенно важное значение ввиду того, что образование в процессе накопления твердой гидридной фазы может привести к выходу из строя отдельных частей установки, рассчитанных на постоянное течение лития.

Соосажденные литий-дейтериевые слои с толщиной около 500 нм были получены на установке МР-2 [1] посредством распыления жидкого литиевого катода дейтериевой плазмой магнетронного разряда. Содержание дейтерия в полученных таким образом пленках измерялось методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС), что проводилось сразу после процесса соосаждения, без вывода слоя на атмосферу. В процессе ТДС анализа температура пленки достигала 1300 К. Помимо потока десорбции при проведении анализа измерялась скорость испарения самого соосажденного слоя при помощи кварцевых микровесов.

Одной из интересных особенностей гидрида лития является изменение цвета кристаллов или поверхности под воздействием ультрафиолетового излучения, в процессе чего происходит выход водорода из материала. На основании данного свойства гидрида лития и было построено предложение рассмотреть облучение ультрафиолетовым излучением как способ облегчения удаления тяжелых изотопов водорода из переосажденных из плазмы литий-дейтериевых слоев при сравнительно небольших температурах.

Под воздействием ультрафиолетового излучения скорость десорбции дейтерия из соосажденного литиевого слоя существенно увеличивалась при температуре начиная от температуры плавления лития по сравнению со слоями, не подвергавшимся воздействию ультрафиолета. В ТДС спектре дейтерия для слоя, подвергнутого воздействию ультрафиолетового излучения в течение 15 минут, не наблюдалось пиков десорбции с температурой выше температуры основного пика десорбции ~ 700 К.

Показано, что рассмотренный метод позволяет эффективно удалять или, как минимум, существенно ускорить процесс выхода тяжелых изотопов водорода из соосажденных из плазмы литиевых слоев при сравнительно низких температурах без необходимости вскрытия плазменных установок на атмосферу.

Список литературы

1. Krat S.A. et al. A setup for study of co-deposited films // J. Instrum. 2020. Vol. 15, № 01. P. P01011–P01011.
2. Krat S.A. et al. Deuterium release from lithium–deuterium films, deposited in the magnetron discharge // Vacuum. 2014. Vol. 105. P. 111–114.
3. Krat S. et al. Isotope exchange in Li-D co-deposited layers at temperatures below 200 °C // J. Nucl. Mater. 2020. P. 152064.

В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ.
*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ташкент,
Узбекистан.*

К ВОПРОСУ МЕХАНИЗМОВ F-T ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Условия реализации автоэлектронной эмиссии на горячем катоде

V.N ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. KHUDOYKULOV.
*Institute of ion-plasma and laser technologies, Uzbek Academy of Sciences,
Tashkent, Uzbekistan*

TO THE QUESTION OF F-T MECHANISMS OF ELECTRON EMISSIONS IN THE CATHODE SPOT OF A VACUUM ARC

Hot-cathode field emission conditions.

В катодных пятнах (КП) вакуумных дуг происходят основные процессы, обеспечивающие практически неограниченную мощность разряда при относительно низких (десятки вольт) напряжениях на электродах [1]. В них реализуется высокая плотность тока ($j=10^8 \text{ A cm}^{-2}$), происходит интенсивное испарение (до $G = 10^4 \text{ г см}^{-2}\text{с}^{-1}$), генерируется плотная ($n_i = 10^{21}\div 10^{22} \text{ см}^{-3}$) плазма, возникают сверхтепловые потоки плазмы, заполняющие межэлектродное пространство со скоростью $= 10^6 \text{ см с}^{-1}$, причем в составе плазмы присутствуют многозарядные ионы (до $z = 5\div 6$), относительная доля которых зависит от теплофизических свойств катода

Разработка критериев *F-T* типа эмиссии электронов в КП вакуумной дуги, выяснение роли таких параметров, как теплота испарения атома катода, атомного веса, работы выхода электрона и определение условий реализации *F-T* типа эмиссии электронов посвящена настоящая работа.

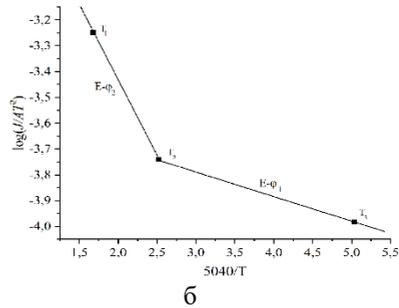
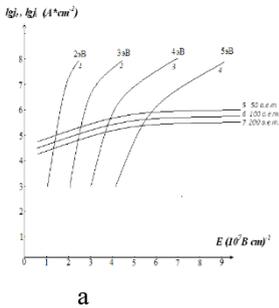
Как известно, плотность тока *F-T* эмиссии электронов определяется уравнением Фаулера-Нордгейма и Ричардсона — Дешмана одна из записей которого имеет вид :

$$j_e = \frac{1,55 \cdot 10^{-6} E_c^2}{t^2(y)\varphi} \exp \left[-\frac{6,85 \cdot 10^7 \varphi^{3/2} \theta(y)}{E_c} \right] \quad (\text{A cm}^{-2}) \quad (1)$$

$$j_i = AT^2 e^{-\frac{e\varphi - \alpha E^2}{kT}}$$

Где E_c - напряженность электрического поля, А-термоэлектрическая постоянная $B \cdot \text{см}^{-1}$; φ – работа выхода электрона, в эВ; $t(y) \approx 1$ и $\theta(y)$ – функции, табулированные Нордгеймом, где $y = \frac{3,62 \cdot 10^{-4} \sqrt{E_c}}{\varphi}$.

Зависимости $lg j_e = f(E_c)$ для различных катодов, отличающихся работой выхода электрона, приведены на рис.1 (кривые 1÷4). Как следует из рис.1, кривые 1÷4 имеют очень крутой наклон, особенно для катодов с малыми значениями φ . Вместе с тем, для реализации плотности тока F эмиссии $j_e > 10^6 \text{ А см}^{-2}$ требуется сильное электрическое поле ($E_c > 10^7 \text{ В см}^{-1}$).



На рис.1а кривые 5÷7 отражены зависимости $lg j_i = f(E_c)$ для различных катодов, отличающихся атомным весом при среднем значении - $U_c = 15 \text{ В}$. Как видно, наклоны кривых 1÷4 и кривых 5÷7 резко отличаются.1б. На графике ниже показано изменение работа выхода при повышении температуры. При температуре 1000К, 2000К, 3000К наблюдается определенное нелинейное изменение плотности тока, в условиях постоянства электрического поля в катодном пятне (10^7 В / см)

Таким образом в условиях автоэлектронной эмиссии в катодном пятне вакуумного дугового разряда с учетом термоэмиссии электронов в “горячем” катод (2273К), реализации разрядом возможно в металлах с работой выхода до 2 эВ и с T2 до T3 до 2,5 эВ [1].

Список литературы

1. Критерий механизмов эмиссии- F эмиссии электронов в катодном пятне вакуумной дуги. Х.Б. Ашуров, В.Н. Арустамов, Р.Б. Нагайбеков, Х.Х. Кадыров, И.Х Худайкулов УФЖ, Узбекистан, Ташкент. сс 180 – 191. 2012 г

В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ
*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз, Ташкент,
Узбекистан.*

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Ионизация в зарядовой системе катодного пятна вакуумной дуге

V.N ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. KHUDOYKULOV.
*Institute of ion-plasma and laser technologies, Uzbek Academy of Sciences,
Tashkent, Uzbekistan*

IONIZATION PROCESSES IN THE CATHODE FRIDAY OF THE VACUUM ARC

Ionization in the charge system of a cathode spot in a vacuum arc

Наличие в плазме дугового разряда ионов, движущихся преимущественно от катода к аноду, при падении напряжения на дуговом разряде 10-30В, и энергии ионов 30-150эВ [1,2]. является интересным физическим эффектом. Проведенное исследование направлено на определение роли в этом ионных скоплений [3].Примем, что КП вакуумной дуги, бесконечно протяженное, параллельно поверхности плоского катода. В области, где концентрация ионов существенно превышает концентрацию электронов, при сильном электрическом поле [2], нейтралы ионизируются эмитированными с катода и ускоренными этим полем электронами в результате возникает избыточный положительный ионный заряд. В этом случае зависимость между потенциалом и концентрацией заряда задается уравнением Пуассона (1).

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

для напряженности электрического поля, которое была получено на основе формулы Маккоуна, исходного в уравнение Пуассона.

$$E_c^2 = \frac{16\pi}{\sqrt{2e}} = (j_i \sqrt{m_i} - j_e \sqrt{m_e}) \sqrt{U_c} = \frac{16\pi}{\sqrt{2e}} [(1-s) \sqrt{m_i} - s \sqrt{m_e}] \sqrt{U_c} \quad (2)$$

где $\rho = (n_i - n_e)e$, - плотность заряда, ϵ_0 – электрическая постоянная. n_i и n_e - концентрации ионов и электронов соответственно. Уравнение (1) при известной зависимости $\rho(z)$ – z решается простым интегрированием.

В пространственном заряде, расположенном между катодом с высокой электропроводностью и струёй, хорошо проводящей квазинейтральной плазмы, есть плоскость, в которой потенциал $U=U_{\max}$ - максимален, напряженность поля $E_0=0$, а суммарные заряды, находящиеся по обе стороны от этой плоскости равны друг другу. Поэтому область пространственного заряда удобно разбить на три зоны. Первая зона S_1 начинается на поверхности катода, вторая зона S_2 включает в себя часть области положительного пространственного заряда, но с уменьшающимся потенциалом. В третью зону S_3 входит область с пространственного заряда с уменьшающимся отрицательным потенциалом, завершающаяся в области его значения равного потенциалу катодного падения $U_{\text{кп}}$

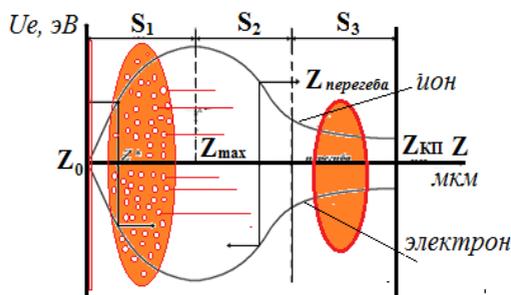


Рисунок 1. - Изменение потенциальной энергии в катодном пятне вакуумной дуги на различных расстояниях от катода: электронов и ионов; $Z_{\text{м}}$ - максимум потенциала, $Z_{\text{пер}}$ - точка перегиба потенциала, $Z_{\text{кп}}$ - координата катодного падения потенциала, Z_0 - точка условного торможения электронов.

Проведенно что в первой зоне S_1 ионы ускоряются к катоду, а во второй S_2 и третьей S_3 к аноду, не встречая потенциальных барьеров покидают рассматриваемую область. Электроны же попадают в потенциальную ловушку. Система зарядов приобретает энергию за счет ускорения эмитированных электронов потенциалом КП и затрачивает ее на ускорение ионов и разогрев электронного газа. Потери на излучение и рассеяние ионов при этом составляют только небольшую долю от этих потерь. при плотности электронного тока 10^6 А/см². Вероятность ионизации атомов близка к единице вплоть до концентраций $7,5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ и начинает падать при больших концентрациях. В результате перезарядки ионов на расстоянии $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ - 10^{-6} см от катода создается слой ионов, формирующий поля до $5 \cdot 10^7$ В/см.

Список литературы

1. Месяц Г. А., Баренгольц С. А. Механизмы генерации аномальных ионов вакуумной дуги // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – №. 10. – С. 1113-1130.
2. Arustamov, V.N., Ashurov, K.B., Mirkarimov, A.M. *et al.* Features of the effect of vacuum arc discharge on a metal cathode surface in the presence of alkali-metal hydroxides and chlorides. *J. Synch. Investig.* **7**, 1104–1109 (2013).
<https://doi.org/10.1134/S1027451013060049>
3. Асюнин В. И. и др. Воздействие однородного магнитного поля на режим срабатывания малогабаритного управляемого вакуумного разрядника // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – №. 2. – С. 182-188.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МАЛОПЛОТНОМ ПОРИСТОМ ВЕЩЕСТВЕ

Представлены результаты численного моделирования процессов поглощения и переноса лазерного излучения в малоплотном пористом веществе. Исследованы особенности распространения гидротепловой волны в случае пористого вещества с плотностью, меньшей и большей критической плотности плазмы, проведено сравнение с экспериментами. Полученные результаты направлены на поиск мишеней лазерного термоядерного синтеза.

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

INVESTIGATION OF THE FEATURES OF LASER RADIATION ABSORPTION AND TRANSPORT IN A LOW- DENSITY POROUS MATTER

The results of numerical simulation of the processes of transfer and absorption of laser radiation in a low-density porous matter are presented. The features of the hydrothermal wave propagation in the case of a porous matter with a density lower and higher than the critical plasma density are investigated, and a comparison with experiments is made. The results are addressed to the development of design of laser thermonuclear target.

Универсальным методом увеличения давления ударной волны является её переход в вещество с большей плотностью. Применительно к использованию лазерного воздействия в самой простой схеме эксперимента метод основывается на использовании мишени в виде слоёв веществ разной плотности, в которой генерация первичной ударной волны происходит за счёт абляции вещества с меньшей плотностью. В качестве малоплотного аблятора такой мишени можно представить себе газ с плотностью, превышающей критическую плотность образующейся плазмы, соответствующую длине волны

воздействующего лазерного излучения. Однако это сопряжено со значительным усложнением технической реализации эксперимента. В этом случае мишень должна помещаться либо в газонаполненную камеру с вводными диагностическим окнами и окном для ввода лазерного пучка, либо конструкция самой мишени должна предусматривать стенки окружающие «газовый» аблятор и тоже окно для ввода лазерного пучка. Более подходящим материалом малоплотного аблятора является пористое вещество лёгких химических элементов. Физика взаимодействия мощного лазерного излучения с пористым веществом активно исследуется в настоящее время в связи с интересом к фундаментальным явлениям лазер-плазменного взаимодействия, имеющим важное значение для ряда прикладных задач и в первую очередь для инерциального термоядерного синтеза. Пористое вещество обладает набором важных достоинств, относящихся к поглощению лазерного излучения и образованию абляционного давления. Одно из них состоит в высокой эффективности поглощения излучения тераваттного лазерного импульса. Кроме того, поглощение лазерного излучения в веществе со сверхкритической плотностью является предпосылкой образования абляционного давления более высокого, чем при воздействии лазерного импульса на твёрдое вещество, когда излучение имеет возможность поглощаться только в образующейся плазме докритической плотности.

В данной работе в рамках модернизации одномерного гидродинамического лагранжева кода Диана [1] в программу включен блок взаимодействия лазерного излучения с пористым веществом. Расчётный алгоритм состоит в том, что для каждой счетной ячейки рассчитывается функция «гомогенизации» ячейки, которая с вою очередь определяет коэффициент поглощения лазерного излучения в ячейке. Проведенные расчеты по моделированию переноса поглощенной лазерной энергии в пористом веществе продемонстрировали хорошее согласие с опубликованными результатами экспериментов по измерению скорости распространения ударной волны в лазерной плазме пористого вещества.

Список литературы

1. Н. В. Змитренко, В. Я. Карпов, А. П. Фадеев и др., ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики 2, 34(1983).

Секция УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Посвящается 100-летию со дня рождения профессора
О.А. Вальднера, заведующего кафедрой
Электрофизических установок МИФИ с 1963 по 1987 годы

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., проф. 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

Н.П. СОБЕНИН

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

**К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА,
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ЛАУРЕАТА
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРЕМИИ СССР, ЗАСЛУЖЕННОГО
ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ СССР
ОЛЕГА АНАТОЛЬЕВИЧА ВАЛЬДНЕРА**



О.А.Вальднер

Я начну воспоминания о своем учителе по работе и жизни Олега Анатольевича Вальднере с переезда кафедры электрофизических установок из помещений МЭИ на улице Красноказарменной 14 в здание школьного типа на улице Усиевича (около метро Сокол). Встал вопрос о назначении лектора по курсу СВЧ из числа сотрудников кафедры и о создании соответствующей учебной лаборатории. Ранее этот курс читал профессор из МЭИ Игорь Всеволодович Лебедев, которого я считаю лучшим лектором в моей жизни. Эту работу заведующий кафедрой профессор Г.А. Тягунов поручил аспиранту О.А. Вальднеру, который к этому времени завершал написание кандидатской диссертации. Выбор заведующего кафедрой оказался правильным. Олег Анатольевич уже в это время пользовался авторитетом среди молодых сотрудников кафедры. О.А. Вальднер сразу понял, что для развития на кафедре предложенного им научного направления по созданию линейных электронных ускорителей необходим полноценный курс по

технике сверхвысоких частот с обязательным лабораторным практикумом. Поэтому его значительные усилия были направлены на создание лабораторного практикума по технике СВЧ. Трудности, несомненно, были связаны прежде всего с материальным обеспечением, с приобретением приборов и элементов волноводной техники. Это же оборудование необходимо было и для развития научных исследований по ускорительной тематике. Первые ВЧ генераторы, частотомеры и измерительные линии делали сами. Однако точность проведения измерений с их помощью оставляла желать лучшего. Прорыв был сделан благодаря умению О.А. Вальднера убеждать людей, в данном случае военных чиновников, о необходимости передачи неликвидного СВЧ оборудования из одного в то время многочисленных “почтовых ящиков” для учебного процесса. Кафедра получила поистине царский подарок, который мы привезли на двух грузовых машинах. Среди оборудования были несколько резонансных частотомеров средней точности, эхо-резонатор, клистронные генераторы, волноводные и коаксиальные измерительные линии, измерители мощности, адаптеры, нагрузки и другие элементы коаксиального и волноводного трактов. На основе этого богатства, наряду с оснащением научной лаборатории, началось создание первой учебной лаборатории по технике СВЧ. Лаборатория размещалась в широком коридоре на третьем этаже здания на Усиевича. Идеологом и непосредственным исполнителем был О.А. Вальднер. Ему помогали и более молодые сотрудники из его научной команды. Первый сборник описания лабораторных работ (“Техника СВЧ, лабораторный практикум”, Атомиздат, 230 стр.) был подготовлен О.А. Вальднером, О.С. Миловановым, Н.П. Собениным и издан в 1974 году. В сборнике содержится 19 работ, которые охватывали все основные разделы курса. Писали этот труд на квартире у О.А. Вальднера. Собирались раз в неделю ровно в 9 утра (Олег Анатольевич любил точность во всем). Обсуждали написанные черновые материалы и вносили коррективы. В процессе творческой работы нередко обсуждали текущие моменты из жизни кафедры и насущные научные вопросы. Так продолжалось до обеда. Обед готовила мама Олега Анатольевича, Наталья Николаевна (выпускница пансионата благородных девиц в Смольном). Как правило, обед был обильный и очень вкусный и в дальнейшем мы с Олегом Сергеевичем с удовольствием слушали неповторяющиеся и очень интересные истории из жизни и опыта Олега Анатольевича, особенно военного времени.

После смерти в 1963 г. заведующего кафедрой Георгия Александровича Тягунова заведующим кафедрой стал Олег Анатольевич Вальднер. Олег Анатольевич пользовался непререкаемым

авторитетом среди молодых сотрудников кафедры. Мы ценили его большой жизненный опыт, высокий интеллект, организаторские способности, умение поставить задачу и предугадать результат исследований, его честность и исключительный оптимизм, веру в успех всех начинаний.



Коллектив кафедры в 1960 г.

При руководстве О.А.Вальднером кафедра стала лучшей кафедрой в институте по масштабу и важности проводимых научных исследований, по постановке учебного процесса с передовыми учебными лабораториями.

О.А. Вальднер, мудрый хозяйственник и прозорливый ученый, всемерно поддерживал талантливых людей. О.А. Вальднер и кафедру выстроил как единый организм, объединенный общей научной тематикой, – ускорители заряженных частиц. Каждый мог найти себе дело по сердцу. Студентов и молодых инженеров О.А. Вальднер опекал особо, старался с младых ногтей прививать им самостоятельность и ответственность. Именно Олег Анатольевич положил начало моде в МИФИ на студенческие конструкторско исследовательские бюро (СКИБ).

Наибольший расцвет кафедры приходится на шестидесятые и семидесятые годы прошлого века. Это было время наиболее бурного развития науки и образования в нашей стране. В эти годы кафедра создала серии линейные укорители электронов U на энергии 3 -30 МэВ для народного хозяйства. Были организованы научные группы по

расчету динамики ускорителей (группа Динус, руководитель А.В.Шальнов), по созданию и настройке ускоряющих структур и узлов высокочастотного тракта (лаборатория СВЧ, руководитель Н.П.Собенин), по системе высокочастотного питания укорителей на базе импульсных магнетронов (группа Генераторы, руководитель О.С. Милованов), вакуумная группа (руководитель А.А.Глазков), нжекторная группа (руководитель В.Ф.Гасс), группа материального обеспечения и связи с заказчиками (руководитель Е.Г.Пятнов). Дизайн ускорителей и разработку рабочих чертежей выполняло конструкторское бюро (руководитель Б.А.Соколов). Наши линейные ускорители электронов были запущены во многих научных центрах СССР. в таких городах, как Обнинск, Новосибирск, Казань, Баку, Алма Ата, Махачкала и в Москве в институте металлургии, институте хим физики АН СССР, в онкологическом центре им. Герцен и др.

У Олега Анатольевича были хорошие отношения с ректором Виктором Григорьевиче Кирилловым Угрюмовым. И это помогало кафедре . Так, завод Квант более чем на половину был занят выполнением работ по созданию элементов и узлов ускорителей. Сотрудники кафедры получали грамоты и медали ВДНХ, успешно защитили докторские диссертации Вальднер О.А., Глазков А.А., Милованов О.С., Собенин Н.П., Шальнов А.В. Сотрудникам кафедры Вальднеру О.А. и Собенину Н.П. в коллективе авторов присуждается в 1979 году Государственная премия СССР за исследования и разработки линейных электронных ускорителей. Начались исследования и по линейным протонным ускорителям.



Посещение ускорителя делегации с космонавтом А. Леоновым и председателем Государственного комитета по науке и технике СССР В.А.Кириллина после получения О.А.Вальднером (крайний справа) Государственной премии СССР

В дальнейшем ЛУЭ стали создавать в научно исследовательском институте электрофизических установок им. Д.В.Ефремова. Кафедра организовала заочную аспирантуру для сотрудников этого института. Наши преподаватели, в том числе и Нобелевский лауреат П.А.Черенков, ездили в Ленинград принимать экзамены. НИИЭФА относился к всеильному в то время министерству среднего машиностроения. Благодаря отлично налаженным связям Олега Анатольевича с чиновниками этого министерства и руководством НИИЭФА мы имели материальные возможности вемти и научную работу. В частности, по инициативе Олега Анатольевича и пр и финансовой помощи НИИЭФА были созданы на основе экспериментов справочные данные по расчету высокочастотных характеристик диафрагмированного волноводов. Этот справочник дважды переиздавался Атомиздатом.

На ускорителях, установленных в бункерах РУЦ, кафедра проводила работы с разными организациями по облучению образцов и изделию Эти средства помогли в оснащении учебные лаборатории современным оборудованием и приборами.

За большую учебную, идейно-воспитательную, научно-исследовательскую и общественную работу, за постоянное успешное

участие в социалистическом соревновании кафедре ЭФУ первой в МИФИ присвоены высокие почетные звания «Коллектив коммунистического труда» и «Образцовая кафедра». В то время это была значимая награда.



Кафедре 25 лет.

Когда мы получили просторные помещения на Каширке в отдельном корпусе с несколькими подземными бункерами, на кафедре уже числилось более 100 сотрудников. Длительное время я исполнял обязанности заместителя заведующего кафедрой по научной работе. Зав. кафедрой О.А.Вальднер появлялся в ускорительном комплексе на техсоветы по средам утром. К его приходу все заранее тщательно готовились. Его выступления и реплики по нашим докладам были очень аргументированы и нацелены на освоение новых горизонтов.

Очень хорошие отношения были со всеми ускорительными центрами страны, а также с ускорительными центрами США, ФРГ, КНР и др. Так, благодаря контактов с руководством Центра Линейных ускорителей в Стенфорде – SLAC (США) наши сотрудники Н.П.Собенин, А.А.Глазков, В.И.Ращиков имели трехмесячные стажировки в этом центре. Во времена перестройки эти зарубежные контакты значительно расширились.



1969 г. О.А.Вальднер и Р.Нил (руководитель SLAC)

Олег Анатольевич очень хотел, чтобы наши научные работы по ускорителям были расширены в институте . Поэтому он просил меня согласиться с предложением ректора Виктора Григорьевича и стать заведующим кафедрой электротехники. Он сохранил за мной один курс по СВЧ на своей кафедре. За десять лет работы заведующим этой кафедры были созданы лучшие в то время учебные лаборатории по курсам электротехнического цикла и разработаны первые в нашей стране линейные ускорители на стоячей волне с бипериодической ускоряющей структурой. 10 аспирантов и соискателей подготовили и защитили по этой тематике кандидатские диссертации. Систему ВЧ питания помогли разработать Олег Сергеевич Милованов с его аспирантами.

Мне посчастливилось многие годы руководить методическим циклом СВЧ, где пришлось тесно взаимодействовать, прежде всего, с профессорами Олегом Анатольевичем и Олегом Сергеевичем. Олег

Анатольевич был несколько консервативен в своем подходе к изложению первой части курса. Мы с Олегом Сергеевичем тщетно пытались подвигнуть его на включение в курс матричных методов расчета волноводных устройств и исключить антенную технику. Все студенты, которые слушали лекции Олега Анатольевича и Олега Сергеевича, восторженно отзывались о них. Их лекции отличались превосходным знанием материала, поскольку они были специалистами в этой области знаний, регулярно вели научную работу на самых актуальных направлениях науки. Олег Анатольевич очень любил порядок и всегда сам являлся примером его соблюдения. Студенты должны были являться на экзамены строго в определенное по графику время. Его лекции отличались четкостью формулировок, умением простыми словами объяснить сложные разделы. В последние годы Олег Анатольевич увлекся при чтении лекций модным тогда использованием технических средств. Заранее он заказывал аудиторию, где был проектор.

В 1989 году О.А.Вальднер ушел с должности заведующего кафедры по возрасту, но продолжал активно работать до смерти за три дня до своего 80-летия.

И.Н. МЕШКОВ

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

СТАТУС И ПЛАНЫ ПРОЕКТА NICA ОИЯИ

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) – новый ускорительный комплекс, разрабатываемый в Объединенном институте ядерных исследований, Дубна, Россия для изучения свойств плотной барионной материи. В докладе будут представлены результаты разработки и строительства комплекса NICA.

I.N. MESHKOV

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

NICA PROJECT AT JINR: CURRNT STATUS AND PLANS

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) is a new accelerator complex designed at the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia) to study properties of dense baryonic matter. Current results of NICA complex development and construction will present in the report.

С.А. МЕЛЬНИКОВ, И.Н. МЕШКОВ

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

МИНИМИЗАЦИЯ ИМПЕДАНСА КОЛЕЦ КОЛЛАЙДЕРА NICA

Одним из критериев, определяющих устойчивость движения заряженных частиц внутри пучковой камеры, является величина ее импеданса. В ходе данной работы приводятся результаты численной симуляции значений импеданса элементов колец коллайдера NICA с целью минимизации их значений, обеспечивающих устойчивость пучка. Для этого вносятся изменения в конструкцию элементов - дополнительные экраны, устранение резонирующих полостей и т. д. На основе симуляции проведены аналитические расчеты для оценки устойчивости динамики пучка.

S.A. MELNIKOV, I.N. MESHKOV

Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

MINIMIZATION THE NICA COLLIDER RINGS IMPEDANCE

One of the criteria determining the stability of the motion of charged particles inside the beam vacuum chamber is the value of its impedances. In the course of this work, the values of the impedance rings of the NICA collider rings elements are numerically simulated to minimize it to the values that provides the stability of the beam. For this purpose, changes are made to the design of the elements - additional screens, elimination of resonant cavities, etc. Based on minimization results, analytical calculations are carried out to assess the stability of the beam dynamics.

Взаимодействие пучка заряженных частиц с пучковой камерой ускорителя приводит к возникновению индуцированных в камере полей (wake-fields) и их обратному воздействию на пучок, приводящему к неустойчивости движения последнего в продольном и поперечном направлениях.

В работе представлены результаты по оптимизации импеданса участка пучковой камеры в арках кольца коллайдера, состоящего из камеры откачки, пикап-станции и сильфонного узла. Всего в арках одного кольца коллайдера устанавливается 46 таких участков.

В общем случае геометрический продольный импеданс пучковой камеры может быть записан в виде $Z_{\parallel}(x, y, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{\parallel}(x, y, z, t) e^{-i\omega t} dt$, где $W_{\parallel}(x, y, z, t) = -\frac{1}{q} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\parallel}(x, y, z, t) dz$. Из теоремы Пановского-Венцеля следует, что поперечный импеданс связан с продольным через соотношение $Z_{\perp}(x, y, z, \omega) = \frac{\beta c}{\omega} \nabla_{\perp} Z_{\parallel}(x, y, z, \omega)$.

Численное моделирование проводилось с помощью программы CST Studio (рис. 1).

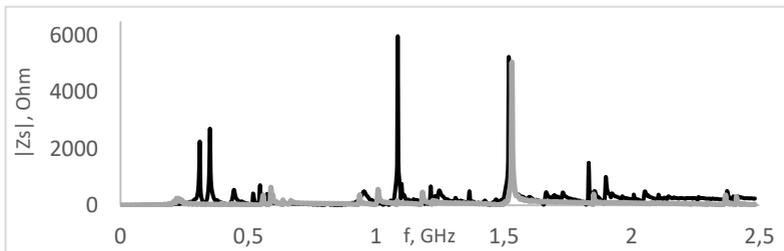


Рис. 1. АЧХ абсолютного значения продольного импеданса для исходной (черная кривая) и оптимизированной конструкции (серая кривая).

На основе полученных результатов были сделаны аналитические оценки устойчивости пучка (рис. 2).

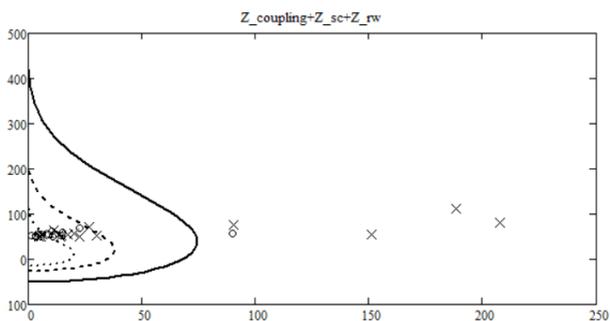


Рис. 2. По оси абсцисс – $\text{Re}[Z_s]$, Ohm, по оси ординат – $\text{Im}[Z_s]$, Ohm. Линии – границы устойчивого движения для разных значений энергии иона: сплошная – 2.5 GeV/u, штрихованная – 3 GeV/u, точечная – 4.5 GeV/u. Точками обозначены амплитуды резонансов импеданса, деленные на номер гармоники: исходная конструкция – \times , оптимизированная – \circ

Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

СПИНОВАЯ ХРОМАТИЧНОСТЬ ПУЧКА: УДЛИНЕНИЕ ОРБИТЫ И БЕТАТРОННАЯ ХРОМАТИЧНОСТЬ

Основная идея измерения электрического дипольного момента основана на измерении усредненной частоты прецессии спина частиц в сгустке. Проблема максимального времени когерентности прецессии спина частиц в сгустке сводится к минимальному разбросу длин орбит всех частиц. Это достигается введением секstupолей с полями, которые минимизируют хроматичность частоты прецессии спина. Мы экспериментально обнаружили, что минимизация хроматичности бетатронного движения приводит к минимизации хроматичности частоты прецессии спина. В этой статье мы исследуем эту взаимосвязь.

YU. SENICHEV, A. AKSENTEV, A. MELNIKOV,
Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia

SPIN CHROMATICITY OF BEAM: ORBIT LENGTHENING AND BETATRON CHROMATICITY

The main idea of measuring the electric dipole moment is based on measuring the averaged precession frequency of the spin of particles in a bunch. The problem of the maximum coherence time for the spin of particles in a bunch is reduced to the minimum spread in the length of the orbits of all particles. This is achieved by introducing sextupoles with fields that minimize the chromaticity of the spin frequency. We have found experimentally that minimizing the chromaticity of betatron motion leads to minimizing the chromaticity of the spin frequency. In this paper we explore this relationship.

Основная идея измерения электрического дипольного момента основана на измерении усредненной частоты прецессии спина частиц в сгустке. Поэтому время, в течение которого колебания спина частицы остаются когерентными, играет решающую роль в экспериментах по поиску электрического дипольного момента протона/ дейтрона. Это время называется временем когерентных колебаний, и его нужно выдерживать как можно дольше. Эффекты спиновой декогеренции возникают из-за зависимости спиновой частоты от колебаний частицы в трехмерном пространстве. Благодаря тому, что все частицы находятся в сепаратрисе, каждая из них должна совершать один оборот по кольцу в среднем за один и тот же период, независимо от длины их орбиты. В связи с этим возникает так называемая эффективная энергия частицы, которая определяет частоту прецессии спина в трехмерном

пространстве. Таким образом, проблема максимального времени когерентности прецессии спина частиц в ступке сводится к минимальному разбросу длин орбит всех частиц. Это достигается введением секступолей с полями, которые минимизируют хроматичность частоты прецессии спина. Мы экспериментально обнаружили, что минимизация хроматичности бетатронного движения приводит к минимизации хроматичности частоты вращения.

В работе мы получаем математическое выражение для удлинения орбиты:

$$\Delta C_{\Sigma} = \frac{J_x}{2} \int_0^C [\gamma_x(s) + K_2 \beta_x(s) \eta(s)] ds + \frac{J_y}{2} \int_0^C [\gamma_y(s) - K_2 \beta_y(s) \eta(s)] ds + \delta_0(\alpha_0 + \alpha_1 \delta_0 + \alpha_2 \delta_0^2 + \dots),$$

где, $\delta_0 = \frac{\Delta p}{p_0}$ -разброс по импульсам, $K_2(s) = \frac{B''(s)}{\rho B_y}$ -секступольная

компонента поля, $\gamma_x(s)$ $\beta_x(s)$ -Твисс параметры, $\eta(s)$ -периодическая дисперсионная функция, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ -компакт фактор нулевого, первого и второго порядков, $J_x(s) = \oint x' dx$, $J_y(s) = \oint y' dy$ - интегралы действия.

Сравнивая его с выражением для хроматичности

$$\xi_x = -\frac{1}{4\pi} \int_0^C (\gamma_x + K_2 \beta_x \eta) ds$$

$$\xi_y = -\frac{1}{4\pi} \int_0^C (\gamma_y - K_2 \beta_y \eta) ds$$

Мы получаем окончательное выражение удлинение орбиты ΔC_{Σ} через хроматичность и через интегралы действия $J_x(s) = \oint x' dx$:

$$\Delta C_{\Sigma} = -2\pi(J_x \xi_x + J_y \xi_y) + \delta_0(\alpha_0 + \alpha_1 \delta_0 + \alpha_2 \delta_0^2 + \dots)$$

Это выражение показывает, что при нулевой хроматичности вклад в удлинение орбиты дает только разброс по импульсам. Это говорит о том, что нулевая хроматичность не является достаточным условием для нулевой спиновой хроматичности.

У. СНАЕ¹, С.В. МАЦИЕВСКИЙ², В.И. РАЩИКОВ², М. ЗОБОВ³

¹*DESY, Hamburg, German,*

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

³*LNF-INFN Frascati, Italy*

МИКРОВОЛНОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ПРОЕКТИРУЕМОМ ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR*

Исследование неустойчивостей, возникающих при взаимодействии пучка заряженных частиц с элементами камеры современных источников синхротронного излучения и коллайдеров, является необходимой задачей, поскольку получить требуемые параметры пучка в таких установках без их учета практически невозможно. Рассматриваются условия возникновения микроволновой неустойчивости в проектируемом источнике синхротронного излучения четвертого поколения USSR с энергией 6 ГэВ и эмиттансом 70 пм. Исследуются возможности уменьшения её влияния на параметры накапливаемого в кольце пучка и, как следствие, на выходные параметры установки.

У. СНАЕ¹, S.V. MATSIYEVSKIY², V.I.RASHCHIKOV², M.
ZOBOV³

¹*DESY, Hamburg, Germany*

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

³*LNF-INFN Frascati, Italy*

MICROWAVE INSTABILITY IN THE DESIGNED USSR SYNCHROTRON RADIATION SOURCE*

The study of instabilities arising from the interaction of a charged particle beam with vacuum chamber elements of modern synchrotron radiation sources and colliders is a necessary task, since it is practically impossible to obtain the required beam parameters in fourth generation synchrotron radiation sources without taking them into account. The conditions for the occurrence of microwave instability in the designed USSR fourth generation synchrotron radiation source with an energy of 6 GeV and an emittance of 70 pm are considered. The possibilities of decreasing its influence on the parameters of the beam accumulated in the ring and, therefore, on the output parameters of the USSR machine are investigated.

В рамках проекта CREMLINplus в России идет разработка проекта создания источника синхротронного излучения четвертого поколения с энергией 6 ГэВ, эмиттансом электронного пучка 70 пм и током пучка 0.2А. Получение пучков с такими характеристиками требуют проведения детального анализа динамики пучка с учетом наведенного

им поля в элементах вакуумной камеры накопителя, являющегося основной причиной возникновения неустойчивостей.

Одним из основных видов неустойчивостей в таких установках является микроволновая неустойчивость, которая связана с возмущением продольного движения частиц сгустка. Для её расчета необходима модель импеданса установки, в которой бы были учтены наведенные сгустком поля во всех элементах вакуумной камеры. Поскольку частотный диапазон и разрабатываемая структура во многом идентична накопителю ESRF, то на первом этапе расчетов в качестве импедансной модели использовалась масштабированная импедансная модель ESRF. Проведенное моделирование с применением кода SBSC, ранее успешно использованного для расчёта продольной динамики пучка с учетом импеданса в аккумуляторном и основных кольцах коллайдера DAΦNE показало, что в нашей установке величина порога неустойчивости (начало роста разброса по энергии в сгустке на графике) оказалась в 3-4 раза меньше, чем в ESRF, что может существенно повлиять на выходные параметры пучка (рис. 1). Как показали расчёты, выполненные с помощью кода ELEGANT [1], повышения порогового тока неустойчивости и времени жизни пучка удастся добиться установкой в кольце гармонических резонаторов.

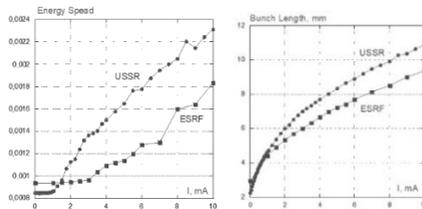


Рис. 1. Зависимость энергетического разброса и длины сгустка от тока

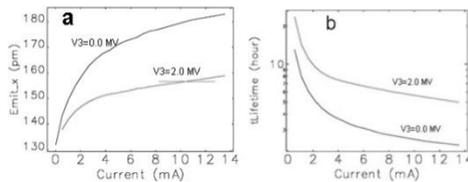


Рис. 2. Зависимость эмиттанса (а) и времени жизни (б) от тока сгустка

Список литературы

1. M. Borland// Advanced Photon Source LS-287, September 2000.

*This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No.871072

С.В. МАЦИЕВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»*

ПОДГОТОВКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR*

Расчёт динамики частиц в источнике синхротронного излучения USSR необходимо выполнять с учётом неустойчивостей, возникающих при взаимодействии пучка с элементами структуры кольца. Для учёта наведённых пучком полей предварительно рассчитываются импедансы отдельных элементов вакуумной камеры, и с их учётом, а также с учётом внутривпучкового рассеяния, и моделируется в дальнейшем динамика пучка. Для расчётов используется ряд программных решений со своими особенностями, достоинствами и недостатками. В данной работе описывается следующие моменты подготовки инфраструктуры для проведения расчётов динамики пучка в источнике синхротронного излучения USSR: выбор программного обеспечения и его настройка; особенности работы с данными программами на вычислительном кластере Курчатовского Института.

S.V. MATSIEVSKIY, V.I. RASHCHIKOV
National Research Nuclear University «MEPhI»

SOFTWARE AND HARDWARE PREPARATION FOR DYNAMICS CALCULATIONS IN USSR SYNCHROTRON RADIATION SOURCE*

Particle dynamics calculations in USSR synchrotron radiation source require taking into account instabilities, arising due to particles interaction with beamline elements. For this, impedance of separate ring elements are imported into dynamics calculations with inter beam scattering. There calculations may be carried out by a number of implementations with different upsides and downsides. Here we describe dynamics calculation infrastructure preparation for the USSR project: software selection and preparation, its deployment on the Kurchatov Institute computational cluster.

Для расчёта динамики частиц в синхротроне первоначально требуется составить карту импедансов элементов ускоряющего тракта. Для проведения этих расчётов часто используют программы ABCI, ECHO, CST и GdfidL. CST и GdfidL могут проводить расчёт трёхмерных структур, но распространяются на коммерческой основе. Это значительно усложняет их использование: в свете санкционных

ограничений получение лицензии осложнено даже при наличии финансирования; условия лицензии искусственно ограничивают количество параллельных расчётов элементов кольца. Программа ABCI [1] позволяет рассчитывать импедансы осесимметричных устройств и не имеет ограничений на количество запущенных процессов. Для этой программы разработан графический интерфейс ruTopPlot, ускоряющий подготовку расчёта; предоставляемый на сайте программы исполнительный файл совместим с расчётным кластером Курчатовского института.

Динамика частиц часто рассчитывается несколькими программами параллельно для исключения ошибок входных данных и кода. Для расчётов динамики были выбраны свободно распространяемые программы Elegant [2], Accelerating Toolbox (AT) [3], SBSC и PyHEADTAIL. Кодам SBSC, PyHEADTAIL и ECHO посвящены отдельные доклады этой конференции.

Программа Elegant использует интерфейс MPI, позволяющий производить вычисления на многих узлах вычислительного кластера. Для создания входного файла расчётов используется локальный сервер Sirepo, предоставляющий графический интерфейс для Elegant. В настоящее время ведётся работа над установкой Sirepo [4] на расчётном кластере.

В отличие от Elegant, AT не является исполняемой программой, а библиотекой функций расчёта динамики для Matlab. Так как Matlab является коммерческим продуктом, он также обладает указанными выше недостатками. Недавний запрет использования Matlab для нескольких китайских университетов является тому подтверждением. В связи с этим была проведена работа по портированию кода для работы со свободно распространяемым клоном Matlab – Octave. В AT была добавлена возможность параллелизации вычислений на основе стандарта OpenMP, что позволило эффективнее использовать вычислительные ресурсы в рамках одной машины. Программа AT хорошо подходит для недавно введённого в эксплуатацию Jupyter сервера Курчатовского института.

Список литературы

1. Yong Ho Chin. <https://abci.kek.jp/abci.htm>
2. <https://www.aps.anl.gov/Accelerator-Operations-Physics/Software#elegant>
3. <https://github.com/atcollab/at/>
4. <https://github.com/radiasoft/sirepo>

* This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No.871072 and has been carried out using computational resources of MCC NRC «Kurchatov Institute», <http://computing.nrcki.ru/>

В.С. ДЮБКОВ, М.В. ЛАЛАЯН, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И.
РАЩИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ

В НИЯУ МИФИ начата разработка компактной системы генерации излучения в световом ондуляторе следующего поколения в диапазоне энергий 5-30 кэВ для кольцевых и линейных источников на основе обратного комптоновского рассеяния. Определена базовая структура и параметры магнитных элементов компактного синхротрона на энергию электронов 20-60 МэВ, входящего в состав системы генерации. Предложены варианты линейного электронного ускорителя, который может выступать как инжектор для синхротрона и как самостоятельный источник электронов с энергией 20-60 МэВ.

V.S. DYUBKOV, M.V. LALAYAN, S.M. POLOZOV,
V.I. RASHCHIKOV

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

PRELIMINARY RESULTS OF THE DEVELOPMENT COMPACT RADIATION SOURCE BASED ON INVERSE COMPTON SCATTERING

Developing a compact system for X-ray radiation production in the energy range of 5-30 keV in a next-generation light undulator for circular and linear sources based on inverse Compton scattering was started in MEPHI. A lattice and parameters of optics elements of 20-60 MeV compact synchrotron, which is part of the generation facility, are chosen. Variants of e-linac, that can be used either an injector for the synchrotron or an standalone source of 20-60 MeV electrons, are proposed.

В НИЯУ МИФИ начаты работы по решению фундаментальной задачи – разработке компактной схемы генерации фотонного излучения в диапазоне энергий 5-30 кэВ для кольцевых и линейных ускорителей на основе обратного комптоновского рассеяния [1, 2]. На сегодняшний день реализованная интенсивность комптоновского источника далека от его потенциальных возможностей: наилучшее устойчиво достигнутое число фотонов в импульсе в несколько сотен тысяч раз меньше теоретически предсказанного. Среди причин, не позволяющих до сих пор получить прогнозируемую теорией величину интенсивности

фотонов в диапазоне энергий 5-30 кэВ, следует отметить короткое время взаимодействия электронного и фотонного пучков, ограничение на мощность лазера, обусловленное возникновением побочных явлений, некогерентность излучения, расходимость и разброс по энергиям электронного и фотонного пучков. Решение данной задачи очевидно связано с исследованием ряда ключевых явлений на стыке областей ускорительной физики и физики излучения пучков заряженных частиц, которые определяют эффективность источника.

В работе представлены текущие результаты разработки линейного ускорителя электронов, включая выбор источника электронов и моделирования процесса фотоэмиссии, разработки магнитной структуры компактного синхротрона, а также предварительные результаты разработки СВЧ ускоряющих структур линейного ускорителя-инжектора.

Список литературы

1. H. Primakoff, Applications for Nuclear Phenomena Generated by Ultra-Intense Lasers, Phys. Rev., 1948. Vol. 73. P. 449.
2. A. Wolski. Beam dynamics in high energy particle accelerators. Imperial College Press. London, 2014.

Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ, А.В. САМОШИН

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА УСРЕДНЕНИЙ ПО БЫСТРЫМ ОСЦИЛЛЯЦИЯМ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПУЧКОВ ИОНОВ

В работе представлены результаты исследования динамики нерелятивистского пучка частиц с использованием метода усреднений по быстрым осцилляциям [1]. Получены системы уравнений движения в усредненных полях ускоряющих резонаторов при наличии фазового скольжения, а также вид эффективных потенциальных функций для двух видов фокусирующих систем. Проведено численное сравнение динамики пучка в усредненных и полных полях.

T.A. LOZEEVA, S.M. POLOZOV, A.V. SAMOSHIN

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

FAST OSCILLATION AVERAGING METHOD FOR ION BEAM DYNAMICS ANALYSIS

The results on the non-relativistic ion beam dynamics investigation using averaging method of the motion equations are presented in this work. Motion equations systems in averaged fields and effective potential functions are derived for the accelerating systems with phase slipping, composed of the periodically spaced short multigap cavities with focusing quadrupoles or doublets between them. Averaged motion beam dynamics was also numerically compared to the full multiharmonic field dynamics.

При исследовании динамики пучков легких и тяжелых ионов в периодических ускоряющих структурах, состоящих, например, из коротких многозазорных резонаторов (четверть- и полуволновых, СН и ИН) важно учитывать влияние высших пространственных гармоник, возникающих при представлении полей периодической последовательности резонаторов и фокусирующих элементов в виде рядов. Напряженность электрического поля резонаторов на участке ускорения при этом представляется кусочной функцией (ускоряющая продольная компонента внутри зазора $E_z \sim \cos(kz)$, вне зазора $E_z = 0$, аналогично для поперечных компонент электрического и магнитного

полей). Рассматривая для примера только продольную компоненту электрического поля и представляя ее функцию $E_z(x, y, z)$ в виде ряда

$$E_z(x, y, z) = \frac{1}{2} E_0 I_0 (k_0 \sqrt{x^2 + y^2}) \left(\frac{a_{0z}}{2} + \sum_n a_{nz} \cos(k_n z) + b_{nz} \sin(k_n z) \right)$$

можем видеть, что частица при ускорении находится под действием некоего эквивалентного постоянного поля, вызывающего перемещение частицы по гладкой траектории, и суммы быстрых (но не малых по величине) компонент, вызывающих малые осцилляции скорости частицы. Метод усреднений по быстрым осцилляциям, кратко изложенный в [1], позволяет аналитически исследовать трехмерную динамику пучка в полях со сложным гармоническим составом, ограничившись при этом «гладким» движением частиц в поле некоего эффективного потенциала U_{eff} , учитывающего вклад высших пространственных гармоник (рис. 1).

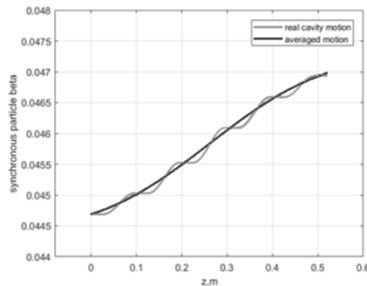


Рис.1. – Прирост скорости протона на примере одного пяти-ззорного СН резонатора в полном поле (светлая кривая) и в поле эффективного потенциала (темная кривая).

В работе представлен вывод эффективных потенциальных функций и анализ динамики пучков ионов для ускоряющих систем с фазовым скольжением, состоящих из периодической последовательности одинаковых резонаторов с расположенными между ними фокусирующими квадрупольными или квадрупольными дублетами. Проведено численное сравнение динамики с использованием метода усреднений по быстрым осцилляциям и динамики пучка в полных полях.

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. – В. 10-ти т. Т. I. Механика. – 4-е изд., испр. – М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 216 с.

А.П. ДУРКИН, А.А. КОЛОМИЕЦ, В.В.ПАРАМОНОВ
*ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН», Москва,
Россия*

АНАЛИЗ СХЕМ ФОКУСИРОВКИ В ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

Рассматривается Ускоряюще-Фокусирующий Канал (УФК) Основной Части (ОЧ) Линейного Ускорителя (ЛУ) протонов на энергию до ~ 230 МэВ, содержащий протяженные ускоряющие секции с высоким темпом ускорения. Показано, что пучки с малым поперечным и продольным эмиттансами могут быть эффективно ускорены в таком канале. Анализируются различные варианты построения фокусирующего канала, приводятся оценки величин фокусирующих полей, обосновывающие возможность его практической реализации.

A.P. DURKIN, A.A. KOLOMIETS, V.V.PARAMONOV
Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia

ANALYSIS OF FOCUSING SCHEMES IN THE MAIN PART OF A LINEAR PROTON ACCELERATOR FOR MEDICINE

The Accelerating-Focusing Channel (AFC) in the main part of the linear accelerator of protons for energies up to ~ 230 MeV, containing extended accelerating section, is considered. The beam having small transverse and longitudinal emittances only can be accelerated in such channel. Various lattices of focusing period are analyzed. Estimation of focusing field values proves the possibility of design and created such channels in practice.

Для обеспечения высокого (до ~ 15 МэВ/м) темпа ускорения в ОЧ ЛУ для протонной терапии применяются ускоряющие структуры на высокой частоте $f \sim 3$ ГГц. Необходимость формирования и ускорения карандашного пучка определяет выбор малого диаметра апертуры (5-7 мм) УФК, что приводит к необходимости малого поперечного эмиттанса пучка. Высокий темп ускорения сопровождается так же увеличенной дефокусировкой пучка ВЧ полем. Один из вариантов УФК ОЧ реализуется в сооружаемом ускорителе LIGHT [1], где между одиночными линзами PMQ расположены секции с эффективной длиной (7-11) $\beta\lambda$, т.е. суммарный набег фазы ВЧ поля по секции равен (14-22) π . Малый диаметр апертуры позволяет уверенно реализовать величину фокусирующего градиента квадрупольных линз до $G \sim 200$ Т/м, [2].

Для повышения среднего по ОЧ темпа ускорения желательно применение более протяженных секций при сохранении в них высокой

напряженности поля. Но в этом случае дефокусировка увеличивается, и компенсировать ее рост можно только уменьшением синхронной фазы, что в [1] ограничено величиной продольного эмиттанса пучка.

В работе [3] дано предложение начальной части ускорителя, формирующей выходе пучок с фазовой шириной $\sim 4^0$ на частоте 476 МГц. Для численного моделирования приняты характеристики такого пучка с учетом шестикратного повышения рабочей частоты ОЧ. Рассмотрены схемы фокусировки дублетами (ФДО) и триплетами (дФд) без симметричной пары (фДф), расположенной в следующем периоде. В последнем случае области устойчивости в фазовых плоскостях (x, x') и (y, y') не совпадают, однако небольшой вариацией полей в крайних линзах относительно средней можно добиться, чтобы одна из них целиком помещалась внутри другой. Тем самым значительно увеличивается область совместной устойчивости.

Анализ показывает, что фокусировка ФДО позволяет ускорять протоны до 230 МэВ с заметно большей, чем в [1], длиной секций при такой же величине равновесной фазы $-(15 - 10)^0$ и практически таком же градиенте фокусирующего поля до 210 Т/м. При значительном же увеличении длины секции, в разы, для частичной компенсации дефокусировки приходится и дальше уменьшать равновесную фазу, но даже в этом случае в начале ОЧ (до энергии ~ 60 МэВ) фокусировка ФДО не обеспечивает условий надежной устойчивости. При рассматриваемой начальной энергии ОЧ во всем УФК ОЧ можно использовать триплеты, но максимальный градиент фокусирующего поля при этом возрастает до 250 Т/м.

Список литературы

1. A. Degiovanni et. al., LIGHT: A Linear Accelerator for Proton Therapy. Proc. NAPAC2016, Chicago, IL, USA, FRB11002, 2016
2. A. Ghais et. al., Permanent Magnet-Based Quadrupoles for Plasma Acceleration Sources. Instruments , v. 3(2), n. 27; <https://doi.org/10.3390/instruments3020027> , 2019
3. V.Paramonov, A. Durkine, A. Kolomiets. Initial Part of a Compact Proton Linac for Applied Purposes. Physics of Particles and Nuclei Letters, v. 17, n.4. p. 624, 2020

С.М. ПОЛОЗОВ¹, В.И. РАЩИКОВ¹, М. КРАСИЛЬНИКОВ²
¹*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*
²*DESY, Zeuthen, Germany*

ФОТОЭМИССИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ С БОЛЬШИМ ЗАРЯДОМ В ВЧ ПУШКАХ

Рассматривается эмиссия коротких электронных сгустков с большим зарядом в высокочастотных пушках. При пикосекундных длительностях лазерного импульса и наличии сильного электрического поля на катоде, картина сильно отличается от традиционного механизма эмиссии, ограниченной пространственным зарядом вылетающих частиц. В этом случае необходимо учитывать влияние положительного заряда ионов, динамически возникающего на поверхности катоде, связанного с конечной скоростью поступления электронов в область эмиссии. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на установке для тестирования фотоинжекторов в PITZ (DESY, Zeuthen, Германия), показало хорошее согласие.

S.M. POLOZOV¹, V.I. RASHCHIKOV¹, M. KRASILNIKOV²
¹*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia*
²*DESY, Zeuthen, Germany*

PHOTOEMISSION OF HIGHLY CHARGED PICOSECOND ELECTRON BUNCHES IN RF GUN

The emission of short electron bunches with a large charge in radio frequency guns is considered. With picosecond laser pulse durations and a strong electric field at the cathode, the picture is very different from the traditional emission mechanism, limited by the space charge of emitted particles. In this case, it is necessary to consider the influence of the ions positive charge, dynamically arising on the cathode surface, associated with finite time of photoelectron transport to the emission region. Comparison of the calculation results with the experimental observations at the Photo Injector Test facility at DESY in Zeuthen (PITZ), showed good agreement.

Рассмотрим типичную картину эмиссии электронов с фотокатода СВЧ пушки на примере фотопушки, разрабатываемой в лаборатории PITZ [1].

В классической модели фотоэмиссии при наличии внешнего электрического поля величина тока эмиссии ограничивается либо электрическим полем на поверхности полупроводника с учётом поля пространственного заряда сгустка, либо эмиссионной способностью фотокатода.

При пикосекундных длительностях лазерного импульса и наличии сильного электрического поля на катоде, картина меняется. В этом случае необходимо учитывать влияние положительного заряда ионов, динамически возникающего в эмиссионном пятне на поверхности катода. Появление положительного заряда связано с тем, что уменьшение концентрации электронов, образующихся под действием лазерного импульса, и быстро покидающих тонкую полупроводниковую пленку под действием сильного электрического поля, не успевает компенсироваться электронами, поступающими из других областей фотокатода в область эмиссии.

На рис. 1 представлена зависимость заряда в сгустке от эмиссионной способности катода, выраженной в единицах заряда, возникающего на катоде за счёт фотоэмиссии под действием лазерного импульса.

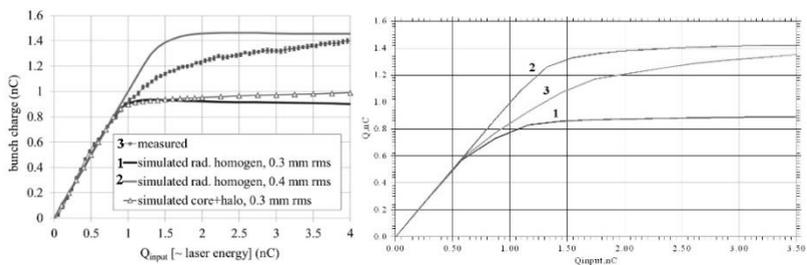


Рис. 1. Зависимость эмитируемого заряда от эмиссионной способности катода. Левый рисунок – данные PITZ [1], правый – расчёты кодом СУМА [2].

На левом рисунке приведены результаты расчета кодом ASTRA [3] (кривые 1,2) и измеренные в PITZ(3), на правом – результаты расчета кодом СУМА. Как видно из рисунков, кривые 1 и 2, рассчитанные для двух различных значений размера пятна лазера на фотокатоде (0,3 мм и 0,4 мм соответственно) по классической модели достаточно хорошо совпадают друг с другом. Однако результаты эксперимента (кривая 3 левого рисунка) сильно отличаются от расчетов (кривые 1 обоих рисунков). Усовершенствование модели фотоэмиссии в коде СУМА введением динамически возникающего на фотокатоде положительного заряда, позволило получить хорошее согласие результатов расчета с экспериментом (кривые 3 обоих рисунков).

Список литературы

1. Krasilnikov M., Chen Y., Stephan F// J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1238, 012064.
2. Rashchikov V.I// Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations 1990. Vol. 10 (18), P. 50–53.
3. K. Flottmann, // 2018, <http://www.desy.de/~mpyflo>

Д. И. ГАРАЕВ^{1,2}, А. А. ТИЩЕНКО^{1,2,3}, Д. Ю. СЕРГЕЕВА^{1,2}
¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
³Международная научно-образовательная лаборатория радиационной физики, НИУ "БелГУ", Белгород, Россия

РАССЕЯНИЕ ПОЛЯ РЕЛЯТИВИСТКОГО ЗАРЯДА НА КЛАСТЕРЕ МИКРОТЕЛ

Рассмотрено рассеяние поля релятивистской заряженной частицы на периодическом кластере сферических микротел. Учтено влияние угла пролёта заряда относительно структуры. Выведены дисперсионные соотношения, определяющие направления пиков излучения. По полученным аналитически выражениям построены спектрально-угловые распределения плотности энергии излучения.

D. I. GARAEV^{1,2}, A. A. TISHCHENKO^{1,2,3}, D. YU. SERGEEVA^{1,2}
¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia
²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia
³Laboratory of Radiation Physics, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

SCATTERING OF THE FIELD OF A RELATIVISTIC CHARGE ON A CLUSTER OF MICROPARTICLES

The scattering of the field of a relativistic charged particle by a periodic cluster of spherical micro-objects is considered. The influence of the angle of flight of the charge relative to the structure is taken into account. The dispersion relations that determine the directions of the radiation peaks are derived. Spectral-angular distributions of the radiation energy density were plotted using the analytic expressions obtained.

Дифракционное излучение, возникающее при пролёте пучка над неоднородной поверхностью, может служить инструментом диагностики параметров пучка. Удобство такого метода заключается в отсутствии возмущения: во время измерения пучок не разрушается и остаётся пригодным для использования. Особое внимание привлекают периодические поверхности, рассеяние поля зарядов на которых называют излучением Смита-Парселла (ИСП) [1]. ИСП в связи с когерентностью рассеяния на отдельных структурных компонентах обладает рядом привлекательных особенностей: высокая интенсивность, дискретная направленность, монохроматичность. Теоретическое и экспериментальное исследование ИСП до недавнего времени было направлено на определённый класс мишеней –

плоскопараллельные металлические пластинки [2]. Современные исследования процесса рассеяния на более сложных структурах, обладающих, например, двумя периодами, говорят о том, что картина излучения становится более сложной, а следовательно информация о пучке более богатой [3].

В данной работе, исходя из первых принципов электродинамики, была построена теория излучения Смита-Парселла от двумерной системы сферических микротел (Рис. 1). Все тела расположены в одной плоскости, в узлах прямоугольной решётки с периодами d_x и d_y . Предполагается, что траектория заряда параллельна плоскости мишени и находится на расстоянии h от неё. Отдельным параметром входит угол пролёта заряда относительно структуры χ .

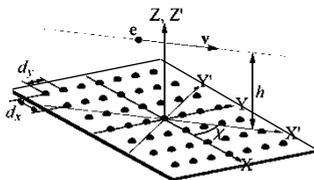


Рис.1. Схематическое изображение кластера микротел

Его включение делает рассмотрение более близким к условиям реального эксперимента, поскольку, ввиду наличия эмиттанта, в реальном электронном пучке присутствует известный разброс в направлениях движения электронов. Конечные построения

спектрально-углового распределения плотности энергии излучения показывают, что данный параметр оказывает существенное влияние на картину излучения. Анализ полученных выражений для спектрально-углового распределения плотности энергии излучения позволил выявить наиболее важный паттерн процесса – дисперсионные соотношения, выражающие зависимость угла пролёта заряда и его скорость с направлением пиков излучения. Дисперсионные соотношения при своей простоте хорошо согласуются с построенными спектрально-угловыми распределениями плотности энергии.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 19-72-00178.

Список литературы

1. S. J. Purcell and E. M. Smith, Visible Light from Localized Surface Charges Moving across a Grating, Phys. Rev. **92**, 1069 (1953).
2. A. P. Potylitsyn, M. I. Ryazanov, M. N. Strikhanov, and A. A. Tishchenko, Diffraction Radiation from Relativistic Particles, Springer Tracts in Modern Physics Vol. **239** (Springer, Berlin, 2010).
3. D. Yu. Sergeeva, A. A. Tishchenko, and M. N. Strikhanov, Microscopic theory of Smith-Purcell radiation from 2D photonic crystal, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B **402**, 206 (2017).

А.В. НЕСТЕРОВИЧ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

УСКОРИТЕЛЬ ЧАСТИЦ, ИМЕЮЩИХ МАГНИТНЫЙ ЗАРЯД

В данной работе показана возможность построения ускорителей для ускорения протонов, имеющих магнитный заряд, в частности, предложена схема ускорителя, а также способ получения магнитных зарядов.

A. V. NESTEROVICH

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

ACCELERATOR OF PARTICLE WITH A MAGNETIC CHARGE

In this paper, the possibility of constructing accelerators for accelerating protons having a magnetic charge is shown, in particular, an accelerator scheme is proposed, as well as a method for obtaining magnetic charges.

В 1931 году Дирак показал [1], что квантовая теория предполагает существование в качестве источников электромагнитные поля точечных магнитных зарядов. Многие научные группы проводили эксперименты по поиску монополей в составе космического излучения лунного грунта, среди вторичных частиц, рожденных при больших энергиях [1]. Этой проблемой занимались в ЦЕРНе [1], в Брукхейвене [1] и др. В частности, предполагалось, что монополи, рожденные при соударениях или под действием γ -квантов, остановятся в мишени, подвергнутой облучению. До сих пор поиски продолжаются, однако статически достоверной информации оказалось недостаточно. В процессе изучения пинчевых сильноточных разрядов в потоке жидкости [2] были обнаружены результаты, которые могли бы быть интерпретированы как свидетельства наличия магнитных зарядов. В первую очередь – это следы на поперечном (вертикальном) срезе металлического образца толщиной до 3 мм, имеющие в подавляющем большинстве вертикальную направленность и одинаковую толщину (около 1 мк). Эти следы в ряде случаев могут быть экстраполированы в единую точку над поверхностью (рис. 1) на высоте порядка 0.4 мм. В результате длительных наблюдений изучен характер этих следов и динамика их появления (в том числе в результате перемещения внутри мишени в силу подвижности дислокаций при нагревании). Был сделан вывод о возможности ускорения магнитных зарядов магнитным полем

вертикальной направленности в пинчах, образующих в основании высотой до 0.5 мм циркулирующий поток (θ -пинч). Согласно оценкам по экспериментальным результатам, магнитное поле может достигать в этой зоне нескольких Тл, ускоряя магнитные заряды. А также [1], эти заряды могут оставлять следы именно такой толщины (~ 1 мк). Ключевым вопросом является происхождение зарядов. Было высказано [2] предположение о их появлении в процессе разрыва связей двухатомных молекул, входящих в состав воздуха (N_2 , O_2) и водяного пара (O_2 , H_2), присутствующих в разряде. Разделение этих зарядов в достаточно сильном магнитном поле и их ускорение является очевидным, поскольку рекомбинация не успевает развиваться за время импульса (~ 1 мкс).

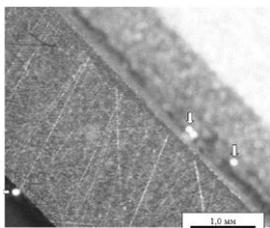


Рис. 1. Треки на срезе образца и сферические объекты на поверхности

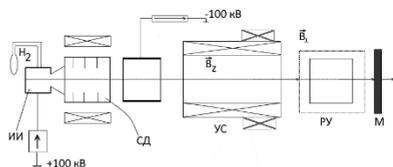


Рис. 2. Схема установки. ИИ – ионный инжектор; СД – система дифференциальной откочки; УС – ускоряющая структура (соленоид); РУ – разделительное устройство; М – мишень.

Особенно важно, что условия плазмообразования в пинче и дуоплазмотроне практически тождественны. Фокусировка пучка может быть осуществлена за счет нарастания по длине амплитуды магнитного поля (силовые линии основную часть пути сближаются, создавая радиальную составляющую поля).

В поле с индукцией 0.1 Тл эти заряды ускоряются с темпом ~ 20 МэВ на сантиметр [1]. В качестве экспериментальной установки может быть использован протонный инжектор с соленоидом, имеющий систему дифференциальной откочки. Схема установки показана на рис. 2.

В настоящее время установка с указанными параметрами находится в состоянии готовности в РУЦ.

Список литературы

1. Е. Амальди и др. Поиски монополей Дирака. В сборнике статей «Монополю Дирака». – М.: Мир. 1972. 332 с. Стр. 7 – 114.
2. А.В. Нестерович. Исследования воздействия пинчевых плазмодов в периодическом разряде в потоке жидкости на окружающую среду. Журнал технической физики, 2019, том 89, вып. 9. Стр. 1344 – 1351. DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48059.432-18.

А.Е. АКСЕНТЬЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ, РАБОТАЮЩЕМ В СПИН- ПРОЗРАЧНОМ РЕЖИМЕ

Исследована принципиальная возможность управления ориентацией оси поляризации пучка в накопительном кольце, работающем в спин-прозрачном режиме, посредством использования спин-навигаторных соленоидов. В частности, рассмотрена спин-динамика пучка дейтронов в данной структуре и исследованы свойства структуры с точки зрения деполяризации пучка по механизму спин-декогеренции.

A.E. AKSENTEV, A.A. MELNIKOV, , Y.V. SENICHEV
Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia

MANIPULATION OF BEAM POLARIZATION ORIENTATION IN A SPIN-TRANSPARENT STORAGE RING

The feasibility of manipulating the beam polarization axis in a spin-transparent storage ring by means of spin-navigating solenoids has been investigated. In particular, deuteron beam spin dynamics in the given lattice and the lattice's properties with respect to beam depolarization via spin decoherence have been considered.

В предполагаемом методе управления поляризацией пучка в спин-прозрачном ("Spin Transparency," далее ST-) режиме частота прецессии спина пучка устанавливается близкой к нулю за счёт использования "сибирских змеек." Поскольку в ST-режиме частицы находятся вблизи целочисленного резонанса, для стабилизации требуемого направления поляризации в детекторе используются соленоиды-"навигаторы" со слабыми полями (рис. 1), вращающие спин-векторы частиц пучка на малые углы.

Была исследована спин-динамика пучка дейтронов в данной структуре, и сделаны выводы касательно принципиальной возможности использования спин-навигаторных соленоидов для управления ориентацией оси поляризации в заданной точке ускорителя.

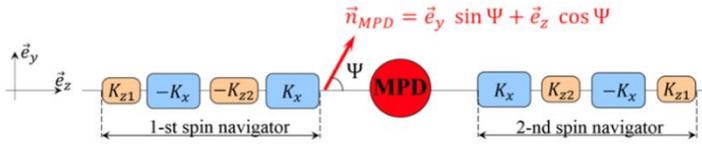


Рис. 1. Схема расположения “навигаторных” соленоидов в промежутке MPD-детектора

В частности, в отношении спин-динамики пучка в структуре был сделан следующий основной вывод: прецессия спин-вектора каждой из частиц пучка происходит по поверхности конуса (рис. 2.), угол раствора которого (равно как и его ось) зависит от эффективного Лоренц-фактора частицы (рис. 3).

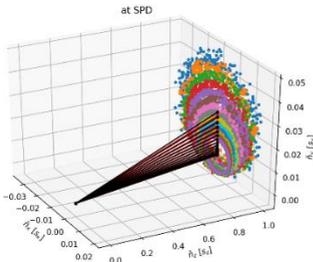


Рис. 2. Равновесные значения осей конусов спин-прецессии для разных частиц сгустка. Цветом обозначены описываемые спин-векторами частиц окружности.

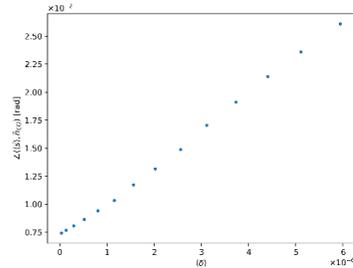


Рис. 3. Угол отклонения оси конуса прецессии спин-вектора частицы от референсного значения в зависимости от равновесной энергии частицы.

В отношении спин-декогеренции было показано, что “спин-навигаторы” не оказывают существенного влияния на спин-декогеренцию пучка.

Таким образом, принципиальная возможность управления ориентацией оси поляризации пучка посредством спин-навигаторных соленоидов, установленных в накопительном синхротроне, работающем в спин-транспарентном режиме, была подтверждена.

Список литературы

1. Кондратенко АМ, Кондратенко МА, Филатов ЮН, Коваленко АД, Бутенко АВ, Михайлов ВА, Сыресин ЕМ, Шиманский СС. *Поляризованные ионы в комплексе NICA*. Обоснование проекта (Дубна, август 2018).

А. В. ЗИЯТДИНОВА^{1*}, П. А. ФЕДИН¹, Т. В. КУЛЕВОЙ¹,
А. А. МАЛЫШЕВ¹, С. Л. БОГОМОЛОВ², А. А. ЕФРЕМОВ²
¹ФГБУ «Институт теоретической и экспериментальной физики» имени
А.И.Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский
институт»

²Объединенный институт ядерных исследований

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В «РЕАЛЬНЫХ»
ПОЛЯХ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ТРАНСПОРТИРОВКИ
ПУЧКА СИЛЬНОТОЧНОГО ИНЖЕКТОРА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ НА БАЗЕ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ**

В рамках программы исследования сверхтяжелых элементов в ОИЯИ г. Дубна ведется разработка сверхпроводящего ЭЦР источника ионов. Для транспортировки ионного пучка, генерируемого данным источником, совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ ведется разработка системы анализа и транспортировки сильноточного пучка многозарядных ионов. В работе представлены результаты второго этапа: моделирования электромагнитных полей в оптических элементах тракта и моделирование динамики в приближении «реальных».

A. V. ZIATDINOVA¹, P. A. FEDIN¹, T. V. KULEVOY¹,
A. A. MALISHEV¹, S. L. BOGOMOLOV², A. A. EFREMOV²
¹Institute for Theoretical and Experimental Physics named by A.I. Alikhanov of
National Research Centre «Kurchatov Institute»

²Joint Institute for Nuclear Research

**BEAM DYNAMIC SIMULATION FOR HIGH CURRENT
MULTICHARGED IONS INJECTOR BASED ON SC ECR
ION SOURCE WITH «REAL» FIELDS.**

ECR ion source is under development at JINR as part of superheavy element research program. Development of a low energy beam transport (LEBT) system for a high current multicharged ions is carried out together with NRC «Kurchatov Institute» - ITEP. The paper describes the second step results of ion beams dynamic simulation in the LEBT with “real” field approximation for optic elements.

Базовой установкой фабрики сверхтяжелых элементов в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ является циклотрон ДЦ-280 [1]. Для генерации сильноточных пучков тяжелых ионов в качестве инжектора для данного ускорителя в ОИЯИ разрабатывается сверхпроводящий источник ионов типа ЭЦР (электронно-циклотронный резонанс) третьего поколения. Для инжекции пучка

ионов в циклотрон необходимо разработать систему транспортировки и анализа пучков. В статье [1] описаны результаты первого этапа данной работы – разработки концептуальной схемы инжектора.

На втором этапе были разработаны модели следующих элементов тракта: соленоид длиной обмотки 154 мм (рис. 1 (а)), квадрупольная линза длиной полюса 200 мм (рис. 1 (б)), поворотный магнит с углом поворота 90° и углами скоса 26° (рис. 1 (в)), ускорительная трубка на предельную разность напряжений 100кВ.

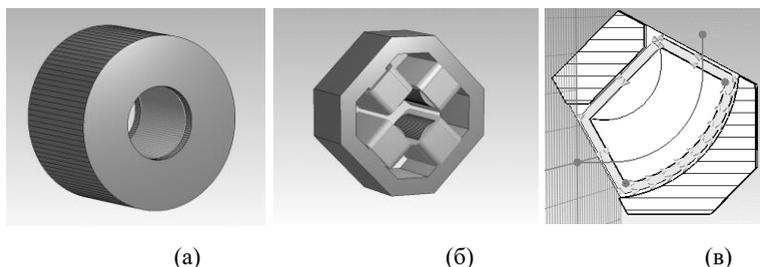


Рисунок 1. – Модели соленоида (а), квадруполя (б), поворотного магнита (в).

В ходе моделирования динамики пучка в транспортном канале с использованием распределения «реальных» полей получены следующие результаты: транспортировка основного пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ составила 96%, а примесного $^{238}\text{U}^{35+}$ – 20% (размер диафрагмы 40мм*100мм). На рис. 2 представлена огибающая пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ в канале транспортировки.

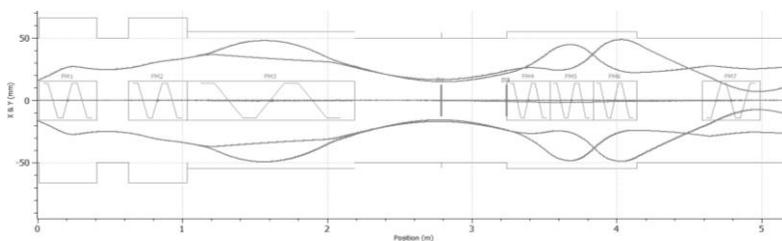


Рисунок 2. – огибающая пучка ионов $^{238}\text{U}^{34+}$ в канале транспортировки

Список литературы

1. А. В. Зиятдинова и др. Разработка системы анализа и транспортировки пучка сильноточного инжектора многозарядных ионов на базе сверхпроводящего ЭЦР источника ионов // Ядерная физика и инжиниринг. 2020. [В печати]

Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР¹, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ¹, Н.Н. ТУРАЕВА²

¹Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Ташкент

²Webster University, USA

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

В рамках модели двух взаимодействующих платформ X и Y иерархической лестницы рассмотрено изменение передачи уплотненной информации при радиационном воздействии на X платформу. Разработанный алгоритм применен к радиационной деградации полупроводниковых приборов (неживая природа), и образованию нового штамма при мутации вирусов (живая природа). Обсуждены пути подавления этих процессов.

B.L. OKSENGENDLER¹, S.X. SULEYMANOV¹, N.N. TURAEVA²

¹Materials Science Institute of SA «Physics-Sun» of Academy of Science Uz, Tashkent

²Webster University, USA

RADIATION EFFECTS IN HIERARCHICAL STRUCTURES

Within the framework of the model of two interacting platforms X and Y of the hierarchical ladder, the change in the transmission of compacted information under radiation exposure to the X platform is considered. The developed algorithm is applied to the radiation degradation of semiconductor devices (inanimate nature), and the formation of a new strain upon mutation of viruses (wildlife). The ways of suppressing these processes are discussed.

В современной радиационной физике конденсированных сред акцент делается при этом на натурфилософию “complexity”, сочетающую нелинейности разного происхождения, в частности, “нано”, “фрактальность”, “малые размерности”, “хиральность” и “синергетику”. Вместе с тем, особую роль здесь должно играть такое свойство синергетики, как иерархичность структур, что стало целью изучения настоящей работы в неживых и живых системах.

Используя методологию радиационной физики, осуществлен анализ роли трех типов атомных перестроек: радиационного дефектообразования (РДО), радиационно стимулированной диффузии (РСД) и радиационных квазихимических реакций (РКХР) в изучении изменения передачи информации с нижней платформы на верхнюю (X – Y). Рассмотрим две соседние платформы иерархической лестницы во

внешней “шумящей” среде. Пусть на нижней ступени динамика элементов x (их всего k) описывается уравнением:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_j, t) + w_i(t) + \sum_{i=1}^k \int_0^t x_i(t') w_{ij}(t' + \tau) dt' \quad (1)$$

Здесь w_i описывает флуктуации от внешних шумов, а w_{ij} – коэффициенты корреляции между элементами i и j , $f_i(x_j, t)$ – “скорости”, моделирующие возможные связи между элементами нелинейного уровня.

Анализ этих k уравнений состоит в поиске ситуаций, когда фаза $\varphi_i(t)$ и амплитуды $A_i(t)$ всех изменяющихся осцилляторов укладываются всеми воздействиями в коррелированную систему, обеспечивающее ненулевое значение величины $y_i \sim \int_0^t x_i(t') w_{ij}(t' + \tau) dt'$, что и соответствует снятию информации с нижней платформы и передачу на верхнюю платформу. Анализ с использованием метода фиктивного осциллятора Ван дер Поля позволил выделить ситуации, когда осцилляторы в возбужденном состоянии проводят больше времени, чем в невозбужденном: $P = \tau_{ex}/\tau_0 > 1$. Наши действия состояли в анализе влияния РДО, РСД, РКХР на параметры в (1) и их отражение в параметрах осциллятора Ван дер Поля [1].

Особое внимание уделено изменению числа k , что соответствовало генерации или стоку элементов x_i . Тепловая компонента радиации учитывалась как в w_i , так и $f_i(x_j, t)$. Полученные на этой основе величины y и P использовались в ряде приложений. В частности, в деградации в многокомпонентных солнечных элементах (например, перовскитов), а также в проблеме мутации вирусов, причем, появлению нового штамма ставилось в соответствии условие, когда $y \neq 0$, что реализовывалось при $P > 1$.

Список литературы

1. [John S. Nicolis, Marianna Benrubi](#) “A model on the role of noise at the neuronal and the cognitive levels”// J. Theor. Biol. 1976. V. 59. P. 77 – 96. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(76\)80024-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(76)80024-0)

К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, П.А. ФЕДИН, Р.П. КУЙБИДА,
А.В. КОЗЛОВ, А.Ю. ЛУКАШИН, П.А. БОГОСЛОВСКИЙ,
С.В. ЛЕЩЕНКО, С.А. ТРЯПКИН, Т.В. КУЛЕВОЙ
НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, Россия

ИМИТАЦИОННЫЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА УСКОРИТЕЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ТИПр-1

Имитационные облучательные эксперименты на пучках тяжелых ионов являются частью экспресс-анализа с помощью которого исследуются эксплуатационные характеристики материалов, подвергающихся воздействию ионизирующих излучений. Для конструкционных материалов реакторов такие эксперименты позволяют наработать дефекты в материале схожие по своей природе с теми, что накапливаются в конструкционных материалах в реакторах. Эксперименты на ионных пучках позволяют сократить время исследований, по сравнению с аналогичными экспериментами, проводимыми на реакторах с использованием нейтронных потоков. Для высокотемпературных сверхпроводящих композитов исследования на ионных пучках позволяют исследовать влияние облучения на характеристики материала. Отсутствие наведенной радиации в облученном образце позволяет использовать для исследований весь набор современного инструментария, в частности атомно-зондовую томографию. В НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ имитационные эксперименты выполняются на тяжелоионном ускорителе ТИПр-1. В докладе представлен обзор проводимых облучательных экспериментов на установке ТИПр-1 и описана подготовка к выполнению экспериментов на пучках ионов меди.

K.E. PRYANISHNIKOV, P.A. FEDIN, R.P. KUIBEDA,
A.V. KOZLOV, A.YU. LUKASHIN, P.A. BOGOSLOVSKIY,
S.V. LESHCHENKO, S.A. TRYAPKIN, T.V. KULEVOY
NRC "Kurchatov Institute" – ITEP, Moscow, Russia

IMITATION IRRADIATION EXPERIMENTS ON THE ACCELERATOR HEAVY IONS HIPR-1

Simulation irradiation experiments on heavy ion beams are part of an express analysis to examine the performance of materials exposed to ionizing radiation. For structural materials of reactors, such experiments make it possible to generate defects in the material, similar in nature to those that accumulate in structural materials in reactors. Experiments on ion beams can reduce the research time, in comparison with similar experiments carried out at reactors using neutron fluxes. For high-temperature superconducting composites ion beam irradiation experiments enables the investigation of the influence of radiation effects on superconductor characteristics. The absence of induced radiation in the irradiated sample makes it possible to use the entire set of modern instruments for research, in particular, atomic probe tomography.

Simulation experiments are performed on the HPr-1 heavy-ion accelerator at the NRC "Kurchatov Institute" - ИТЭР. The report provides an overview of the irradiation experiments carried out at the HPr-1 facility and describes the preparation for experiments with copper ion beams.

В НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ на ускорителе тяжелых ионов ТИПр-1 с 2009 года проводятся имитационные облучательные эксперименты. Ускоритель ТИПр-1 представляет собой ускоряющую структуру с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ (RFQ)) и может ускорять ионы с отношением массы к заряду до 60 до энергий 101 кэВ/нуклон. В качестве источника ионов используется вакуумно-дуговой источник ионов металлов (MEVVA). Длительность импульса составляет 475 мкс с частотой повторения 1 импульс в 2 секунды. Облучение образцов материалов может проводится с одновременным их нагревом до 500°C.

Имитационные эксперименты на ускорителе ТИПр-1 проводятся для задач поиска новых конструкционных материалов реакторов, в частности, материалов стенок реакторов [1], композитных высокотемпературных ленточных сверхпроводящих материалов.

Для проведения имитационных экспериментов на пучке меди для образцов высокотемпературных ленточных сверхпроводящих материалов определено зарядовое состояние ускоренных ионов меди для расчета флюенса и выполнена настройка канала вывода ускорителя ТИПр-1, состоящего из трех квадрупольных линз, для обеспечения требуемой равномерности покрытия пучком образцов. Определение характеристик пучка в месте мишени проводилось с использованием сцинтиллятора и ПЗС-камеры.

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.

К.С. САГАН

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

**РАСЧЕТ ПОРОГА МИКРОВОЛНОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
ДЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ (ИССИ 4) С ПОМОЩЬЮ
БИБЛИОТЕКИ PYHEADTAIL ЯЗЫКА
ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON**

Приведен результат расчета порога микроволновой неустойчивости в ИССИ 4. Данный результат получен на основе анализа результатов моделирования динамики пучков заряженных частиц в данном синхротронном источнике. Моделирование было произведено с использованием библиотеки PyHEADTAIL языка программирования python. Также были рассмотрены структура и основные модули данной библиотеки.

K.S. SAGAN

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

**CALCULATION OF THE LONGITUDINAL MODE
COUPLING INSTABILITY THRESHOLD IN A
SYNCHROTRON USING THE PYHEADTAIL LIBRARY OF
THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE**

The result of the calculation of the microwave instability threshold in the Ultimate Source for Synchrotron Radiation (USSR) is presented. This result is obtained on the basis of the analysis of the results of modeling the dynamics of charged particle beams in this synchrotron source. The simulation was performed using the PyHEADTAIL library of the python programming language. The structure and main modules of this library were also considered.

ИССИ 4 – источник синхротронного излучения 4 поколения с энергией электронов на 6 ГэВ, длиной кольца 1055 м и предполагаемым натуральным эмиттансом 68 пм, который предполагается построить в Протвино к 2025 году. Такой маленький эмиттанс необходим для больших значений светимости и одной из главных проблем в достижении таких значений эмиттанса является различные зависящие от числа частиц в пучке коллективные неустойчивости, которые возникают при взаимодействии интенсивного пучка заряженных частиц с электромагнитными полями, индуцированными им в вакуумной камере ускорителя (wake-полями). В данной работе рассматривается

микроволновая неустойчивость, которая возникает при взаимодействии сгруппированного пучка с продольными wake-полями. Это взаимодействие приводит к резкому возрастанию энергетического разброса пучка при некотором значении тока пучка. Значение данного тока и называется порогом микроволновой неустойчивости.

Для его расчета была использована библиотека PyHEADTAIL[1]. Библиотека PyHEADTAIL – это библиотека с открытым кодом для численного моделирования динамики пучков заряженных частиц, написанная на языках программирования Python, C, C++, Cython и CUDA в 2014 году в ЦЕРНе для изучения коллективных эффектов в кольцевых ускорителях.

Библиотека позволяет проводить моделирование пучка в кольце с заданной магнитной структурой, рассчитанной, например, в программе MADX, и ускоряющей структурой, импортировать наведенные пучком wake-поля, полученные с помощью другого софта, например, кодов ECHO, GDFDL, CST, и таким образом их влияние на развитие неустойчивостей. Также имеется немало инструментов для постобработки результатов.

Сам процесс написания кода с помощью PyHEADTAIL можно разбить на несколько этапов.

Импорт необходимых модулей библиотеки.

Создание объектов. Например, объект “bunch”, который содержит информацию обо всех макрочастицах пучка, или объект “machine”, соответствующий ускорителю со всеми его параметрами и входящими в него элементами.

Составление «схемы» (build maps) кольца: расставление магнитной структуры и резонаторов вдоль кольца, добавление различных эффектов, которые будут влиять на движение пучка, в том числе коллективных эффектов. Это может быть радиационное затухание, wake-поля.

Далее пучок прогоняется через ранее построенную «схему» кольца заданное количество раз (track).

В конце происходит постобработка полученных результатов.

Для расчета микроволновой неустойчивости было промоделировано движение пучка при различных интенсивностях пучка. Для каждой интенсивности пучок проходил через кольцо 12000 оборотов. Пример такого расчета представлен на рис. 1. За это время его энергетический разброс и длина начинали осциллировать около некоторого равновесного значения, которое и бралось для дальнейшего определения порога микроволновой неустойчивости. В результате было

показано (рис. 2), что порог микроволновой неустойчивости оказывается порядка 1 МА.

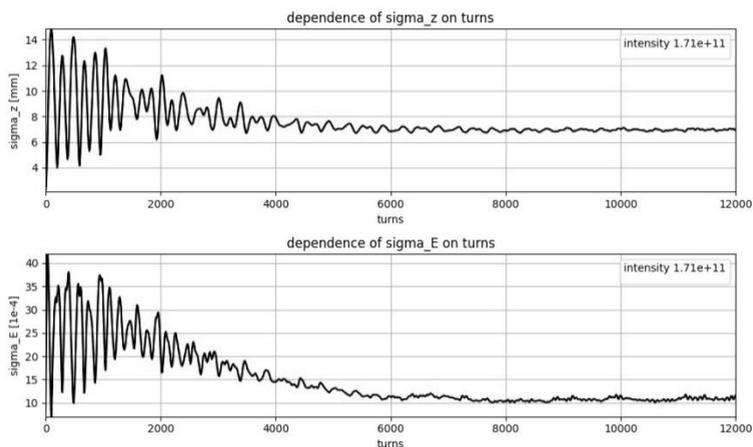


Рис. 1. График зависимости длина пучка и его энергетического разброса от его количества оборотов.

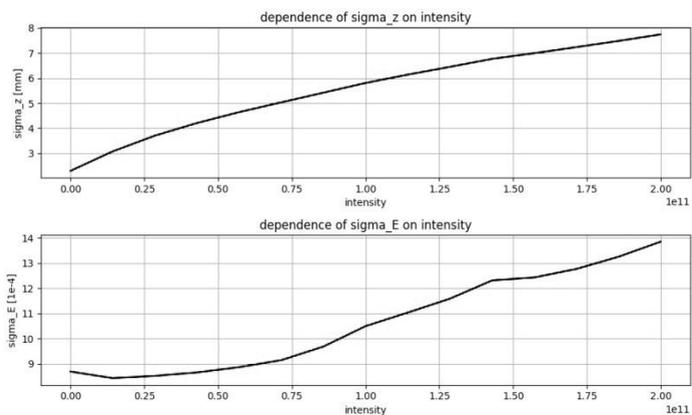


Рис. 2. График зависимости длина пучка и его энергетического разброса от его интенсивности.

Список литературы

1. <https://github.com/PyCOMPLETE/PyHEADTAIL>

И.В. НОВИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ПРОВОДЯЩЕЙ СТРУКТУРЕ С ВРАЩАТЕЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ

Программой ECHO рассчитаны наведенные пучком поля в резонаторе с рабочей частотой 357 МГц, который планируется использовать в проектируемом в настоящее время в РФ источнике синхротронного излучения четвертого поколения. Изучены принципы и особенности работы кода ECHO: использование графического интерфейса программы, построение соответствующей геометрии структуры, выбор параметров пучка и размера сетки.

I. V. NOVIKOV

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

CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS GENERATED BY AN ELECTRON BUNCH IN A CONDUCTING STRUCTURE WITH ROTATION SYMMETRY

The ECHO program has been used to calculate the bunch-induced fields in a resonator with an operating frequency of 357 MHz, which is planned to be used in a fourth-generation synchrotron radiation source currently being designed in the Russian Federation. The principles and features of the work of the ECHO code are studied: the use of the graphical interface of the program, the construction of the corresponding geometry of the structure, the choice of the bunch parameters and the mesh size.

В настоящее время в мире быстро развиваются исследования, проводимые с помощью мощных источников синхротронного излучения. С этим и связана разработка специализированного источника синхротронного излучения четвертого поколения ИССИ-4. Переход к новому поколению источников синхротронного излучения влечет за собой увеличение рабочих энергий, уменьшение поперечного эммитанса пучка, а также рост интенсивности заряда в самом пучке.

Последнее из вышеперечисленных обстоятельств приводит к тому, что растут неустойчивости пучка в системе, которые во многом определяются наведенными пучком в структуре ускорителя электромагнитными полями.

Для расчета этих полей, называемых wake-полями, используются различные программы, наиболее популярными из которых являются CST STUDIO SUITE и GDFDL. Недостатком этих программ является высокая стоимость, что ограничивает круг использования, поэтому для расчета wake-полей идет поиск свободно распространяемых аналогов, способных дать достаточно точный результат.

На роль одного из аналогов рассматривается программа ECHO, являющаяся бесплатной на данный момент. В коде данной программы используется конформный метод конечных разностей, который представляет из себя универсальный способ решения краевых задач [1].

В качестве примера был проведен расчет наводимых полей пучком с среднеквадратичной длиной 1 мм в 357 МГц резонаторе, который планируется использовать для ВЧ системы накопителя ИССИ-4.

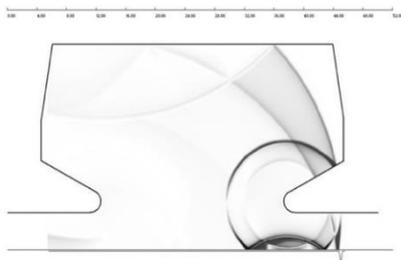


Рис. 1. Моделирование наводимых пучком wake-полей в резонаторе

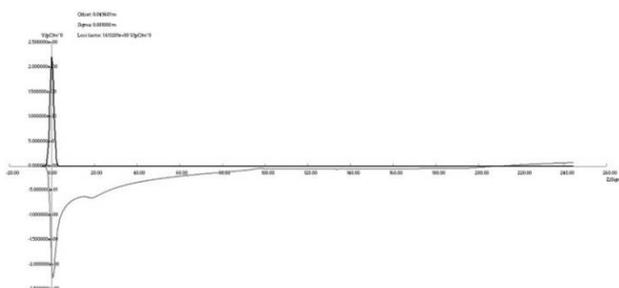


Рис. 2. Продольный след в резонаторе

Полученные в ходе расчетов wake-поля будут использованы для построения импедансной модели накопителя, необходимой для исследования неустойчивостей пучка.

Список литературы

1. I. Zagorodnov. Electromagnetic code ECHO. User's Manual. 2020

С.В. МАЦИЕВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАСЧЁТ НАВЕДЁННЫХ ПОЛЕЙ В РЕЗОНАТОРЕ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ ABCI*

Расчёт динамики частиц в источнике синхротронного излучения USSR необходимо выполнять с учётом неустойчивостей, возникающих при взаимодействии пучка с элементами структуры кольца. Для учёта наведённых пучком полей предварительно рассчитываются импедансы отдельных элементов вакуумной камеры, и с их учётом, а также с учётом внутрипучкового рассеяния, и моделируется в дальнейшем динамика пучка. В данной работе описывается разработанный графический интерфейс программы ABCI и расчёт наведённых полей в резонаторе источника синхротронного излучения USSR.

S.V. MATSIEVSKIY, V.I. RASHCHIKOV

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

WAKEFIELD CALCULATION IN USSR SYNCHROTRON RADIATION SOURCE RF CAVITY WITH CODE ABCI *

Particle dynamics calculations in USSR synchrotron radiation source require taking into account instabilities, arising due to particles interaction with beamline elements. For this, impedance of separate ring elements are imported into dynamics calculations with inter beam scattering. Here we describe graphical user interface developed for the ABCI program and wakefield calculations of the USSR synchrotron radiation source accelerating cavity.

Для расчёта динамики частиц в синхротроне первоначально требуется составить карту импедансов элементов ускоряющего тракта. Одной из применяемых для этого программ является *Azimuthal Beam Cavity Interaction* (ABCI) [1]. Данная программа решает уравнения Максвелла во временном диапазоне в аксиально симметричных структурах в присутствии ускоряемого пучка с нормальным распределением.

Для программы ABCI был разработан графический интерфейс *ruTopPlot* [2], ускоряющий подготовку расчёта. В частности, программа позволяет интерактивно задавать геометрию устройств, что в отсутствии графического интерфейса является трудоёмкой задачей. Окно редактирования геометрии программы *ruTopPlot* представлено на Рис. 1; окно настройки параметров расчёта – на Рис. 2.

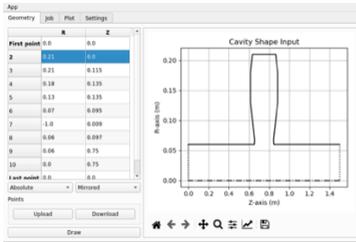


Рис.1.

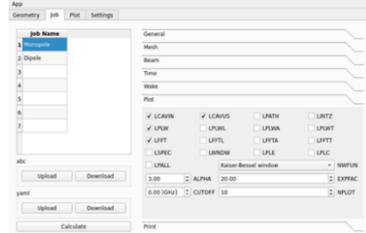


Рис.2.

Для резонатора источника синхротронного излучения USSR, геометрия которого представлена на Рис. 1, при помощи программы ABCI были рассчитаны наведённые поля. Продольный и поперечный импедансы резонатора представлены на рисунках Рис. 3 и Рис. 4 соответственно.

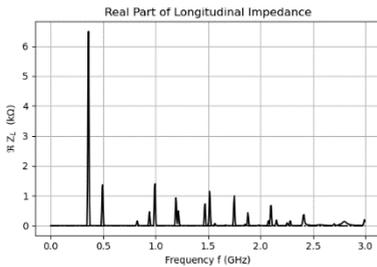


Рис.3.

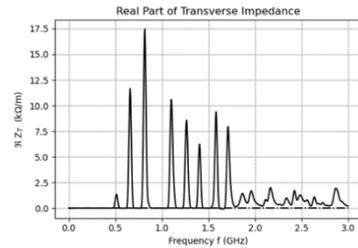


Рис.4.

Полученные таким образом импедансы ВЧ резонаторов (в нашем случае их 5) суммируются с импедансами других устройств, входящих в состав накопительного кольца. Таким образом и составляется импедансная модель установки, необходимая для дальнейшего моделирования поведения пучка заряженных частиц в нём.

Список литературы

1. Yong Ho Chin. <https://abci.kek.jp/abci.htm>
2. <https://pypi.org/project/pytopplot/>

* This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No.871072 and has been carried out using computational resources of MCC NRC «Kurchatov Institute», <http://computing.nrcki.ru/>

Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКОВ ИОНОВ В УСКОРИТЕЛЕ-ДРАЙВЕРЕ LINAC-100 ДЛЯ ПРОЕКТА DERICA

В работе представлены результаты моделирования динамики трехзарядного пучка урана-238 (U^{59+} , U^{60+} и U^{61+}) в одном из вариантов сверхпроводящего ускорителя-драйвера первичных интенсивных пучков стабильных изотопов LINAC-100, разрабатываемого в настоящее время для нового комплекса по наработке и исследованию редких изотопов DERICA (Dubna Electron-Radioactive Ion Collider fAcility) на базе ОИЯИ (Дубна, Россия).

T.A. LOZEEVA, S.M. POLOZOV

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

ION BEAM DYNAMICS IN LINAC-100 FOR THE DERICA FACILITY AT JINR

The results on the beam dynamics simulation and analysis for the three-charge state Uranium beam (U^{59+} , U^{60+} и U^{61+}) in one of the versions of the superconducting high-intensity primary stable isotope driver-accelerator LINAC-100, being under development for the new ambitious rare isotope facility DERICA based in JINR (Dubna, Russia).

В настоящее время в ОИЯИ ведется разработка новой фабрики редких изотопов DERICA (Dubna Electron-Radioactive Ion Collider fAcility). Данный перспективный комплекс будет предназначен для проведения широкого спектра экспериментов с ускоренными пучками первичных стабильных изотопов и вторичных радиоактивных изотопов. В состав комплекса DERICA входит несколько ускорителей – линейный ускоритель-драйвер LINAC-100, пост-ускоритель вторичных пучков LINAC-30, бустерное кольцо, ион-электронный коллайдер, а также электронный ускоритель [1].

Первым в каскаде ускорителей является LINAC-100 – частично сверхпроводящий ускоритель-драйвер первичных интенсивных непрерывных пучков стабильных изотопов с различными соотношениями A/Z с выходной энергией пучков до 100 МэВ/нуклон [2]. Ускоренные пучки далее попадают во фрагмент-сепаратор, где производятся вторичные пучки радиоактивных изотопов, захватываемые пост-ускорителем LINAC-30 и следующими ускорителями в каскаде. Драйверу LINAC-100 при этом необходимо

работать с широким спектром пучков первичных ионов с A/Z в диапазоне от 3,5 до 7 (от бора до урана). Первоначально самым «инертным» для ускорения из набора первичных изотопов являлся изотоп урана-238, ободраный до зарядового состояния $34+$. Однако, в различных вариантах компоновки сверхпроводящей части LINAC-100 для ускорения урана U^{34+} до 100 МэВ/нуклон приходилось использовать большое количество сверхпроводящих резонаторов, что сильно повышало стоимость ускорителя. Поэтому для сохранения приемлемой стоимости ускорителя, уменьшения числа резонаторов и сокращения его длины были рассмотрены варианты установки обдирочных устройств – стрипперов, повышающих зарядность ионов урана для более эффективного их ускорения. В ходе последних исследований свойств различных стрипперных ячеек (газовых, литиевых, графитовых фольг) [3, 4] было показано, что эффективность обдирки для пикового зарядового состояния из распределения (здесь U^{60+}) составляет около 25%, то есть при последующем захвате ускорение ионов урана только с одним зарядовым состоянием удастся сохранить только четверть первоначальной интенсивности пучка. Однако, обдирка пучка при энергии 10 МэВ/нуклон и захват трех соседних зарядностей – U^{59+} , U^{60+} и U^{61+} позволяет сохранить около 60% первоначальной интенсивности (0,6 мА полного тока трехзарядного пучка).

Один из текущих вариантов компоновки ускорителя-драйвера LINAC-100 выглядит следующим образом: одна или две (отдельно для легких и тяжелых ионов) нормально проводящих (или частично сверхпроводящих) начальных части ускорителя с энергией до 10 МэВ/нуклон, N_2 газовый стриппер, установленный на энергии пучков 10 МэВ/нуклон, и основная сверхпроводящая часть. В данной работе представлены результаты исследования динамики трехзарядного пучка урана в текущей версии сверхпроводящей части LINAC-100, состоящей из трех групп независимо фазируемых четверть- и полуволновых резонаторов.

Список литературы

1. A.S. Fomichev, L.V. Grigorenko, A.L. Barabanov et al. // *Phys. Usp.* 2019 **62** P. 675–690
2. Sergey M Polozov et al // *Phys. Scr.* 2020. **95** 084006
3. Tolstikhina I, Imai M, Wincler M N and Shevelko V P 2018 *Basic Atomic Interactions of Accelerated Heavy Ions in Matter 98 1* (Berlin: Springer)
4. [W.Barth](#), [A.Fomichev](#), [L.Grigorenko](#) et al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019 **1350** 012096

А.Р. КАРИМОВ^{1,2,3}, В.К. БОГДАНОВ², В.В. ДМИТРИЕВА²,
Т.В. САВИНKOVA³

¹ОИВТ РАН, Россия, 127412, Москва

²НИИУ МИФИ, Россия, 115409, Москва

³Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова Россия,
117997, Москва

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ С ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ

В работе рассматривается динамика процесса кластеризации в среде, состоящей из неподвижных, тяжелых отрицательно заряженных частиц и подвижных положительных ионов. Считается, что, в результате кулоновского слипания данных частиц образуются неподвижные нейтральные макромолекулы. В рамках гидродинамического описания анализируется влияние поля скоростей подвижной компоненты на происходящие кинетические процессы. Задача исследуется в электростатическом приближении для одномерной геометрии с учетом реакций первого и второго порядка.

В лагранжевых переменных получены точные аналитические решения, которые показывают, что в рассматриваемая модель в зависимости от начальных распределений допускает как сингулярное поведение, когда в некоторых точках возникает неограниченный рост плотности, так и регулярное поведение без развития сингулярностей. Используя данные результаты, анализируется развитие сингулярностей на процессы кластеризации с учетом ряда физических факторов. Сделан вывод о преобладающем влиянии поля скоростей на эти процессы. Хотя предложенная модель безусловно является идеальной, представляется, что она адекватно описывает последнюю стадию образования кластеров в реальных диссипативных средах.

A.R. KARIMOV^{1,2,3}, V.K. BOGDANOV², V.V. DMITRIEVA²,
T.V. SAVENKOVA³

¹*Institute for High Temperatures RAS, Russia, 127412, Moscow*

²*National Research Nuclear University MEPhI, Russia, 115409, Moscow*

³*Plekhanov Russian University of Economics, Russia 117997, Moscow*

DYNAMICS OF ELECTRO-HYDRODYNAMIC FLOWS WITH CHEMICAL REACTIONS

The present paper has considered the dynamics of clustering process in a medium consisting of immobile, heavy negatively charged particles and mobile positive ions. The immobile neutral macromolecules are assumed to be formed as a result of the Coulomb interaction of these particles. Within the framework of hydrodynamic description, the influence of velocity field for mobile particles on the ongoing kinetic processes is analyzed. The problem is investigated for electrostatic approximation taking into account the clustering reactions for the first and second order. The Lagrangian fluid description is employed to solve the initial value problem for one-dimensional, compressible fluid flows with these clustering reactions represented by the Euler–Poisson system. The Lagrangian fluid description is employed to solve the initial value problem for one-dimensional compressible fluid flows represented by the Euler–Poisson system with clustering terms.

These exact analytical solutions have shown that in the model worked out, depending on the initial distributions, one may see both singular behavior, when an unlimited increase in density occurs at some points and regular behavior without the development of singularities. Using these results the development of singularities on clustering processes is analyzed taking into account a number of physical factors. A conclusion is made about the prevailing influence of the velocity field on these processes. Although the model worked out is undoubtedly ideal, one can expect that the one adequately describes the last stage of cluster formation in real dissipative media.

а.м.БУЛЫГИН ¹, А.Р.КАРИМОВ ^{1,2,3}, В.И.Перов ³,
М.А.ГАВРИЛЕНКО ⁴

¹*Институт Лазерных и Плазменных Технологий, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409, Москва*
²*Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127412, Москва*
³*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Россия, 117997, Москва*

⁴*Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Россия, 119991, Москва*

СВОБОДНАЯ ДИНАМИКА АЭРОЗОЛЕЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К РАСПРОСТРАНЕНИЮ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНЫХ ИНФЕКЦИЙ

Исследуется влияние начальной скорости и размера капель жидкости на разлёт частиц в пространстве под действием силы тяжести и стока трения. Проведена оценка допустимых расстояний, на которые могут распространиться аэрозольные частицы в зависимости от начальных условий. Данная модель рассматривается в приложении к передаче вирусных заболеваний, в частности COVID 19, воздушно-капельным путем.

A.M.BULYGIN ¹, A.R.KARIMOV ^{1,2,3}, V.I.PEROV ³,
M.A.GAVRILENKO ⁴

¹*Institute for High Temperatures RAS, Russia, 127412, Moscow*
²*National Research Nuclear University MEPhI, Russia, 115409, Moscow*
³*Plekhanov Russian University of Economics, Russia, 117997, Moscow*
⁴*The First Sechenov Moscow State Medical University, Russia, 119991, Moscow*

FREE DYNAMICS OF AEROSOLS IN THE APPLICATION TO THE AIRBORNE TRANSMISSION

We investigated the influence of the initial velocity and the size of liquid droplets on the dispersion of particles in space under the effect of the gravitational field and the Stokes friction force. Estimation of the permissible distances over which aerosol particles may propagate is carried out depending on the initial conditions. The model worked out is studied in application to the transmission of viral diseases, in particular COVID 19, by airborne droplets.

Большинство инфекций, включая коронавирусы, могут передаваться как воздушно-капельным путём при кашле или чихании, так непосредственно при дыхании в струе воздуха, содержащей аэрозольные частицы, на которых могут находиться возбудители болезни [1]. Поведение такого биологического аэрозоля в атмосфере

подчиняется общим физическим закономерностям [2], а его активность обусловлена наличием в его частицах жизнеспособного патогенного биоагента [1].

Как правило, по фракционно-дисперсному составу биологические аэрозоли относятся к полидисперсным системам. Чем выше степень дисперсности аэрозолей, тем выше их удельная поверхность (суммарная поверхность частиц в единице объёма). Размер частиц колеблется в широких пределах (от десятых долей до десятков и сотен микрометров) и определяет способность биоагента проникать в дыхательные пути.

В настоящей работе рассматривается вопрос распространения биологических аэрозолей в пространстве в поле сил трения Стокса и тяжести в зависимости от начальной скорости аэрозоля. В работе приведены оценки дистанции, горизонтальной и вертикальной скоростей, в зависимости от начальных данных, размера частиц аэрозоля и условий окружающей среды.

Список литературы

1. Bougrouiba L. // Annu. Rev. Fluid Mech. 2021. Vol. 53, P. 473-508
2. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем // СПб.: ИИХ СПбГУ. 1999, 194с.

И.А. ЮРИН, С.М. ПОЛОЗОВ, М.С. ДМИТРИЕВ

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

РАЗРАБОТКА КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ

Рассчитана квадрупольная электромагнитная линза с диапазоном градиента магнитного поля 6-18 Тл/м для ускорителя легких ионов с отношением заряда к массе $>0,3$ на энергию 7,5 МэВ/нуклон. Рассмотрено два варианта – непрерывный и импульсный режим работы. Определена оптимальная форма полюса, выбраны марки стали в соответствии с режимом работы, рассчитаны тепловые нагрузки и система охлаждения, рассмотрен принцип работы импульсного источника.

I.A. YURIN, S.M. POLOZOV, M.C. DMITRIEV

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

DEVELOPMENT OF A QUADRUPOLE LENS FOR A LIGHT ION ACCELERATOR

The quadrupole lens with a magnetic field gradient in the range of 6-18 T / m is designed for the 7.5 MeV/nucleon light ion ($A/Z < 3.5$) accelerator. Two concepts of the magnets is discussed continuous and pulsed operating modes. The optimal shape of the pole was simulated, the steel quality was selected in accordance with the operating mode, the thermal loads and the cooling system were calculated. The principle of operation of the pulsed source was investigated.

Квадрупольный магнит состоит из основного магнитопровода и четырех катушек индуктивности, размещенных на каждом из полюсов, катушка может работать как в постоянном режиме работы, так и в импульсном, что в последующем накладывает определенные требования к системам питания и конструкции магнита. Для непрерывного режима работы была выбрана низкоуглеродистая сталь марки ст.10, так как для нее индукция технического насыщения составляет $B \approx 1,5$ Тл. Была выбрана форма магнитопровода «разборный квадрат» - для простоты изготовления и упрощения сборки. Так как мощность каждой катушки составляет $P = 830$ Вт, была рассчитана и смоделирована система охлаждения. Катушка выполнена из медной профилированной трубы $5 \times 10 \times 1,5$ мм ГОСТ 16774-2015, требуемый расход воды для эффективного охлаждения $Q = 1,183$ л/м. Также разработан импульсный вариант квадруполья, обеспечивающий более экономичное энергопотребление и не требующий активной системы

охлаждения. Для импульсного режима работы потребовалось заменить марку стали, т.к. в данном случае требуется более крутая зависимость $V(H)$ кривой, была выбрана кремнистая сталь 3413. Форма и конструкция магнитопровода изменена по двум причинам: 1) в материале сердечника возникают вихревые токи, для ограничения τ (постоянная времени вихревых токов) [1] магнитопровод делают шихтованным, оптимальная толщина листа при данной марке составляет 0,35-0,5 мм, 2) IGBT транзисторы в источнике питания накладывают ограничения на максимальный ток и напряжение в цепи питания. Варьируя ширину полюса, определялось оптимальное значение индуктивности катушки.

Принцип работы импульсного источника питания основан на LC контуре, где предварительно заряженная емкость C разряжается в индуктивность L , в результате расчетов и моделирования ток в катушке составляет $I=184$ А, напряжение на обкладках конденсатора $U = 685$ В (результаты моделирования см. рис.1), тепловая нагрузка не выходит за пределы количества тепла отводимого свободной конвекцией.

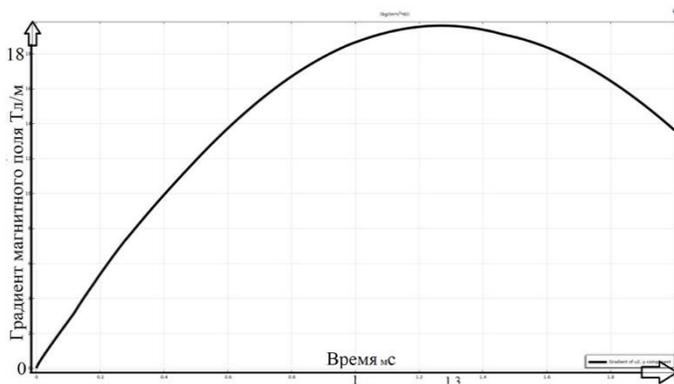


Рис. 1. Результаты моделирования импульса (данный график показывает время (1,3 мс), за которое устанавливается требуемый градиент магнитного поля в сечении канала).

Список литературы

1. А.Г. Пономаренко. Мощная импульсная техника. М.: МИФИ, 2007г. 200с.

А.А. МЕЛЬНИКОВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ ОСИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА ПОСРЕДСТВОМ СПИН- НАВИГАТОРНЫХ СОЛЕНОИДОВ В СПИН-ПРОЗРАЧНОМ КОЛЬЦЕ

Исследовалась устойчивость метода управления ориентацией оси поляризации в заданной точке ускорителя посредством спин-навигаторных соленоидов к ошибкам установки поворотных магнитов кольца. Для этого было оценено изменение компонент инвариантной оси прецессии спина, вызванное “неидеальностью” структуры накопительного кольца, работающего в спин-прозрачном режиме. Изучалось поведение вектора поляризации в данной структуре; были сделаны выводы о возможности задания направления поляризации посредством “навигаторных” соленоидов в области мишени.

A.A. MELNIKOV, A.E. AKSENTEV, Y.V. SENICHEV
Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia

ROBUSTNESS OF THE SPIN-NAVIGATOR BASED METHOD FOR THE MANIPULATION OF THE BEAM POLARIZATION AXIS IN A SPIN-TRANSPARENT STORAGE RING

We have investigated the robustness to bend magnet installation error of the spin-navigator based method's for manipulating the beam polarization. Toward that end, variation of the invariant spin axis components along the beamline of an imperfect storage ring operating in the spin transparency mode has been estimated. The beam polarization vector behavior in the given lattice has been investigated. Conclusions are made regarding the feasibility of using “spin navigator” solenoids for defining the beam polarization axis in the target.

В предполагаемом методе управления поляризацией пучка в спин-прозрачном (“Spin Transparency,” далее ST-) режиме частота прецессии спина пучка устанавливается близкой к нулю за счёт использования “сибирских змеек.” Поскольку в ST-режиме частицы находятся вблизи целочисленного резонанса, для стабилизации требуемого направления поляризации в детекторе используются соленоиды-“навигаторы” со слабыми полями (рис. 1) [1], вращающие спин-векторы частиц пучка на малые углы.

В представленной работе была исследована спин-орбитальная динамика пучка дейтронов в данной структуре, и сделаны выводы

касательно устойчивости метода управления ориентацией оси поляризации в заданной точке ускорителя посредством спин-навигаторных соленоидов к ошибкам установки поворотных магнитов кольца.

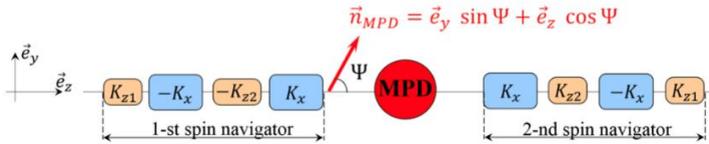


Рис. 1. Схема расположения “навигаторных” соленоидов в промежутке MPD-детектора

В частности: дипольные магниты поворачивались на углы $\sim N(0, 10^{-4})$, при этом относительное изменение частоты прецессии спина и продольной поляризации $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-3}$, $\Delta P/P \sim 10^{-5}$. Эти величины обусловлены ненулевой выборочной реализацией мат. ожидания и, как следствие, появлением ненулевой Y проекции инвариантной оси прецессии спина N_y в области детектора.

Было изучено влияние сдвига мат. ожидания распределения углов поворота элементов на $\pm 10^{-3}$ рад. При этом $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-2}$, $\Delta P/P \sim 10^{-4}$, $\Delta N_y \sim 10^{-2}$ (рис. 2). Качественного изменения спиновой динамики не наблюдалось, что говорит о стабильности движения в окрестности нулевого резонанса.

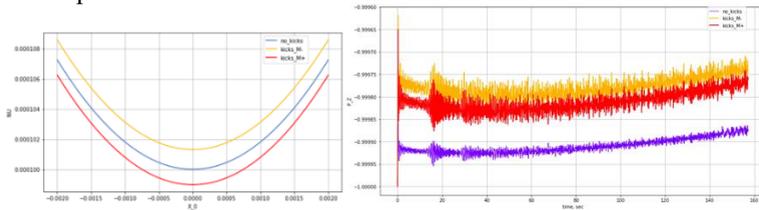


Рис. 2. Частота прецессии спина в зависимости от поперечной координаты и зависимость продольной поляризации пучка от времени в точке детектора для идеальной структуры и при поворотах магнитов вокруг продольной оси на углы $\sim N(\pm 10^{-3}, 10^{-4})$.

Список литературы

1. Кондратенко АМ, Кондратенко МА, Филатов ЮН, Коваленко и др. *Поляризованные ионы в комплексе NICA*. Обоснование проекта (Дубна, август 2018).

Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, Г.О. БУЯНОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ (ИРПЗ) КАК СРЕДСТВО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ УГРОЗЕ ИЗ КОСМОСА

В данной работе описаны возможности применения искусственных радиационных поясов Земли для обнаружения объектов типа чебаркульского метеорита. Описан метод для решения данной задачи с помощью заряженных частиц.

B.YU. BOGDANOVICH, G.O. BUYANOV, A.V. NESTEROVICH
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

ARTIFICIAL RADIATION BELTS OF THE EARTH (ARBE) AS A MEANS OF PREVENTING THREAT FROM SPACE

This paper describes the possibilities of using the artificial radiation belts of the Earth to detect objects such as the Chebarkul meteorite. A method for solving this problem using charged particles is described.

Печальный опыт последних лет показывает, что удовлетворительных средств обнаружения приближающихся к Земле небесных тел, представляющих реальную угрозу, практически нет (имеются в виду не микрометеориты и громадные болиды, из которых первые не обнаруживаются ввиду малых размеров, а вторые представлены ограниченным количеством). Речь идет об объектах типа чебаркульского.

Помочь в решении данной проблемы могло бы создание ИРПЗ, способных длительное время (годы и даже десятилетия) находиться в космосе, будучи единожды созданными и «подпитываемыми» с космических аппаратов-инжекторов, находящихся в качестве ИСЗ (искусственных спутников Земли) в непосредственной близости от ИРПЗ.

Суть метода поясняется на рис. 1. При прохождении болида через зону локализации ИРПЗ он заряжается при попадании на поверхность электронов, что приводит к образованию провала плотности в ИРПЗ, совершающему как целое движение, определяемое динамикой электронов, потерянных на его поверхности. Приведем расчетную формулу для определения «долготы» образованного «провала»

плотности ИРПЗ в момент прохождения боида через зону локализации ИРПЗ:

$$S = \Delta t \cdot v_1 \left(1 - \frac{v_d}{v_2} \right) \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

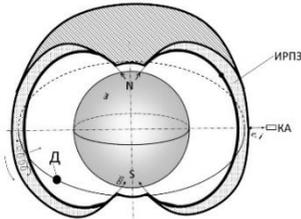


Рис. 1. Схема получения и функционирования ИРПЗ. З – Земля; М – метеорит (боид); Д – детектор.

где S – расстояние от точки на экваторе, соответствующей прохождению через нее силовой линии магнитного поля, определяющей точку пересечения боидом ИРПЗ; v_1 – скорость движения проекции «возмущения» вдоль экватора, соответствующей максимальной энергии электронов ИРПЗ; v_2 – скорость движения возмущения с меньшей скоростью (энергией); v_d – скорость движения детектора по экватору; Δt – разность времени регистрации сигналов

(провал тока ФЭУ от сцинтилляционных детекторов). Для нерелятивистских частиц (электронов) может быть использована формула [1]:

$$T_3 \approx \frac{44}{EL}, \quad (2)$$

где T_3 – период дрейфа электрона вокруг Земли [мин]; E – энергия электронов ИРПЗ [МэВ]; $L = \frac{R_3}{R_3}$, где R_3 – радиус экватора ИРПЗ, R_3 – радиус Земли, а также формула для индукции магнитного поля Земли:

$$B_r[r_e] \approx 0.3 \left(\frac{R_3}{R_3} \right)^3 \quad (3)$$

Создание 2-го ИРПЗ на другой высоте даст ответ на вопрос о скорости и направлении движения боида. Создание таких ИРПЗ может быть обеспечено с космической станции, содержащей источники электронов и протонов (для поддержания её потенциала при отрицательном значении, препятствующем возвращению электронов ИРПЗ. Протоны могут инжектироваться вдоль силовой линии магнитного поля, что предотвращает их возвращение, с потенциалом, достаточным для этого – более потенциала станции (по модулю) [2].

Список литературы

1. С.Н. Кузнецов, Л.В. Тверская. Радиационные пояса. В книге «Модель космоса: научно-информационное издание: в 2 т.». Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т. 1: Физические условия в космическом пространстве. – М.: КДУ, 2007. 872 с. Стр. 518.
2. A.V. Nesterovich, B.Yu. Svirin, V.K. Baev. Dynamics of charged particles in the field of a spherical magnetic dipole. Technical Physics volume 57, pages 137–140 (2012). DOI: 10.1134/S1063784212010033

И.А. АШАНИН^{1,2}, С.М. ПОЛОЗОВ^{1,2}

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»,
Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, Россия

ДИНАМИКА ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ- ИНЖЕКТОРЕ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СИБИРЬ-2»

Для инъекции 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 300 (или 200 в упрощенном варианте) МэВ [1]. Предложена модернизированная компоновочная схема ЛУЭ и его отдельных элементов. Проведена оптимизация геометрии ускоряющей структуры с целью уменьшения спектра пучка на выходе ЛУЭ. Выполнено сквозное «front-to-end» моделирование динамики пучка.

I.A. ASHANIN^{1,2}, S.M. POLOZOV^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²National Research Center “Kurchatov Institute” Moscow, Russia

BEAM DYNAMICS SIMULATION IN A LINEAR ELECTRON ACCELERATOR – NEW INJECTOR FOR ACCELERATING COMPLEX SIBERIA-2 UPGRADE

New linear electron accelerator (linac) with an energy of about 300 (or 200 in a simplified version) MeV is being proposed for injection into the booster synchrotron, which is being developed for the reconstruction of the SIBERIA-2 accelerator complex in the NRC «Kurchatov Institute» [1]. A modernized linac and its specific elements layout will be described in the report. Optimization of the geometry of the accelerating structure was done out in order to reduce the beam spectrum at the output of the linac. A front-to-end beam dynamics simulation results will discuss.

Общая схема нового ЛУЭ-инжектора на энергию 300 МэВ представлена на рисунке 1. О включает в себя трехэлектродную пушку на энергию 100 кэВ, клистронный группирователь, адиабатически группирователь и шесть регулярных секций.

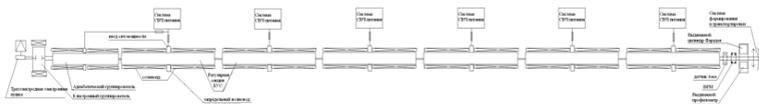


Рис. 1. Общая схема ЛУЭ на энергию 300 МэВ

Было выполнено сквозное «front-to-end» численное моделирование динамики электронного пучка с использованием разработанной в МИФИ программы BEAMDULAC-BL [2]. Ток инжекции был выбран равным 600 мА. Численное моделирование проводилось поэтапно, с контролем параметров на выходе из группирователя, после второй, четвертой и шестой регулярных секций. Анализ результатов сквозного моделирования динамики пучка показал, что энергетический спектр после регулярной части ускорителя составит $\pm 3,5\%$. Поперечный эмиттанс составит около 10 нм рад, коэффициент токопрохождения будет равен 54-56 %. Результаты моделирования динамики пучка в полной структуре представлены на рисунке 2.

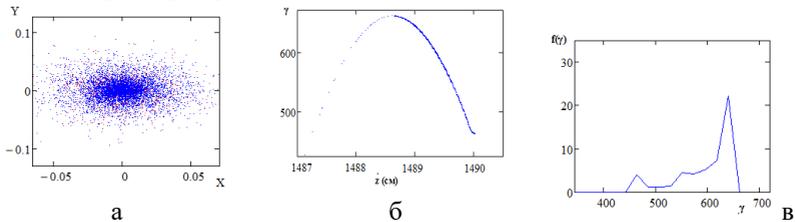


Рис. 2. Поперечное сечение пучка (начальное распределение показано красным цветом, на выходе – синим) (а), фазовый портрет на фазовой плоскости (γ, z) (б) и энергетический спектр (в) при фазе инжекции в адиабатический группирователь $-0,75$ после шестой регулярной секции.

Список литературы

1. Ашанин И.А., Полозов С.М., Рашиков В.И.. Линейный ускоритель электронов для ускорительного комплекса «Сибирь-2». VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2020». Сборник научных трудов. Москва, 2020. С. 282-283.
2. Bondarenko T.V., Masunov E.S., Polozov S.M.. 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.

С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия
Московский Физико-Технический Институт, Долгопрудный, Россия

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОЛЛАЙДЕРА NICA С ВЫСОКОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ.

Исследованы способы повышения критической энергии для протонной опции коллайдера NICA. Применен метод суперпериодической модуляции градиентов квадрупольей. Осуществлен выбор секstupольей для подавления натуральной хроматичности и компенсации секstupольной компоненты. Приведены параметры Твисса для предложенных структур, а также исследованы динамические апертуры и рабочие точки.

S.D. KOLOKOLCHIKOV, Y.V. SENICHEV
Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia
Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

MAGNETO-OPTICAL STRUCTURE OF THE NICA COLLIDER WITH HIGH CRITICAL ENERGY

Methods of increasing the critical energy for the proton option of the NICA collider are investigated. The method of superperiodic modulation of quadrupole gradients is applied. The selection of sextupoles is carried out to suppress the natural chromaticity and compensate for the sextupole component. The Twiss parameters for the proposed structures are given, as well as the dynamic apertures and working points are investigated.

Для увеличения критической энергии ускорительного кольца NICA рассматривается возможность изменения дисперсионной функции путем модуляции градиентов квадрупольей на поворотных арках кольца. Для этого рассматривается суперпериод, состоящий из 3-х ФОДО ячеек, где центральный фокусирующий квадруполь отличается от двух крайних БОЛЬШИМ значением градиента.

Для одного суперпериода коэффициент расширения орбиты определяется по формуле [1]:

$$\alpha_s = \frac{1}{v_{x,арк}^2} \left\{ + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{R}_{arc}}{v_{x,арк}} \right)^4 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{g_k^2}{(1 - kS/v_{x,арк}) [1 - (1 - kS/v_{x,арк})^2]^2} \dots \right\}, (1)$$

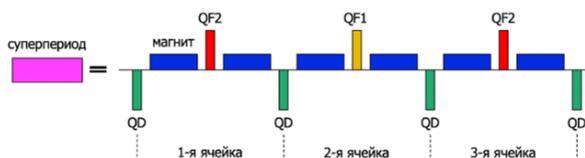


Рисунок 4 Введение суперпериода, состоящего из 3-х ФОДО ячеек

Первая гармоника $k = 1$ является определяющей и для 12 ФОДО ячеек реализуемо условие для количества суперпериодов $S = 4$, $\nu_{x,арк} = 3$, где 3 ФОДО ячейки объединены в один суперпериод.

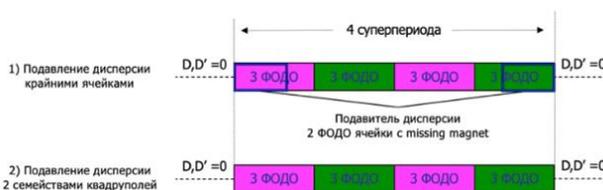


Рисунок 5 Принципиальная схема двух возможных вариантов подавления дисперсии для протонной опции коллайдера NICA

Учитывая особенность структуры коллайдера NICA, наличие missing-магнитов на двух крайних ячейках не дает возможность создать полностью регулярную арку из 4-х одинаковых суперпериодов. Таким образом, необходимо обеспечить подавление дисперсии на краях арки. Рассматриваются 2 возможных случая подавления дисперсии:

1. Подавление дисперсии при помощи крайних суперпериодов. А именно двух крайних ФОДО ячеек.
2. Подавление дисперсии всей аркой, при помощи выбора градиентов квадруполов двух семейств.

Оба приведенных способа повышения критической энергии позволяют достичь требуемого значения критической энергии, однако имеют свои особенности при конечной реализации.

Список литературы

1. Yu. V. Senichev and A. N. Chechenin. Theory of “Resonant” Lattices for Synchrotrons with Negative Momentum Compaction Factor. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2007, Vol. 105, No. 5, pp. 988–997

И.А. АШАНИН^{1,2}, С.М. ПОЛОЗОВ^{1,2}

¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»,
Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, Россия

ДИНАМИКА ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ- ИНЖЕКТОРЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ «СИЛА» (ИССИ-4)

Целью работы было исследование динамики пучка в линейном ускорителе, который планируется использовать для инъекции пучка в накопительное кольцо (top-up инъекция) и в качестве драйвера сгустков высокой яркости для лазера на свободных электронах Специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения «СИЛА» (ИССИ-4) на энергию 6 ГэВ, разрабатываемого в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» [1]. В докладе рассматриваются результаты численного моделирования динамики пучка в таком линейном ускорителе.

I.A. ASHANIN^{1,2}, S.M. POLOZOV^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²National Research Center "Kurchatov Institute" Moscow, Russia

BEAM DYNAMICS SIMULATION IN A LINEAR ELECTRON ACCELERATOR –INJECTOR FOR THE 4TH GENERATION SPECIALIZED SYNCHROTRON RADIATION SOURCE USSR

The purpose of this work was to analysis the beam dynamics in a linear accelerator, which is planned to be used for beam injection into storage ring (top-up injection) and as a high-brightness bunch driver for a free electron laser in the USSR project which is being developed in the NRC «Kurchatov Institute» [1]. The beam dynamics simulation results in such a linear accelerator will discuss in the report.

Для численного моделирования динамики пучка использовалась программа BEAMDULAC-BL, разработанная в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) [2]. В качестве возможных вариантов основной секции были рассмотрены как классические ускоряющие структуры на бегущей волне, так и бипериодические ускоряющие структуры (БУС), работающие на стоячей волне. Секция на бегущей волне при амплитуде ускоряющего поля 600 кВ/см дает прирост энергии, равный 80 МэВ (длина секции 3 м). Регулярная часть ускорителя будет состоять из 76

секций. Пучок на выходе имеет спектр около $\pm 3\%$ FWHM при энергии 6 ГэВ, а поперечный эмиттанс равен 10 мм·рад с термопушкой и 1–5 нм·рад с фотопушкой. В случае использования структуры на стоячей волне при длине секции 2,1 м пучок ускоряется примерно на 70–75 МэВ. При использовании фотопушки в качестве форинжектора энергетический спектр для сгустка с зарядом 250 пКл равен 0,08 %, поперечный эмиттанс составит около 0,3 нм·рад, для варианта с термопушкой – 0,2 % и 1,5 нм·рад. При сквозном моделировании динамики от фотокатода до выхода ускорителя коэффициент токопрохождения достигает 99,5 %. Результаты моделирования динамики такого пучка представлены на рис. 1.

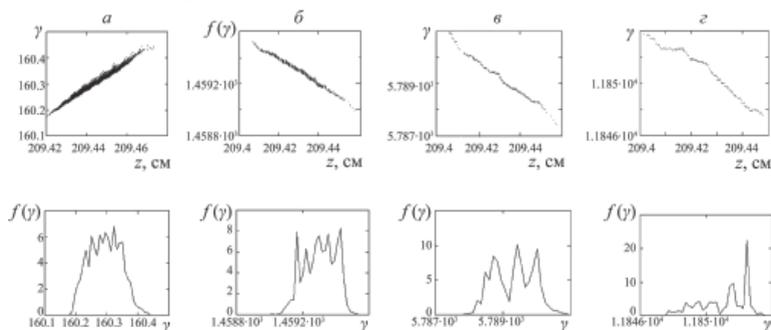


Рис. 1. Результаты моделирования динамики пучка в регулярной части ускорителя для сгустка с зарядом 250 пКл, сгенерированного фотопушкой.

Показаны фазовые портреты пучка (вверху) на плоскости (γ, φ) и энергетический спектр (внизу) после 1-й (а), 10-й (б), 40-й (в) и последней 82-й (г) секций

Список литературы

1. Ашанин И.А., Ключевская Ю.Д., Кулевой Т.В., Полозов С.М. и др.. Текущие результаты работ по разработке ускорительного комплекса Российского Специализированного Источника Синхротронного Излучения 4-го поколения ИССИ-4. V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2019». Сборник научных трудов. Москва, 2019. С. 109-111.
2. Bondarenko T.V., Masunov E.S., Polozov S.M.. 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.

Г.О. БУЯНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАМОЖЕННОГО КОНТРОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Описан метода повышения эффективности преобразования «электрон-фотон» за счет вывода пучка электронов в атмосферу и транспортировки его в воздухе. Представлен принцип действия данного метода.

G.O. BUYANOV

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

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CUSTOMS CONTROL WITH THE BREMSSTRAHLUNG OF A LINEAR ELECTRON ACCELERATOR

A method is described for increasing the efficiency of the "electron-photon" conversion by extracting an electron beam into the atmosphere and transporting it in air. The principle of operation of this method is presented.

Использование метода определения наличия взрывчатых и наркотических веществ за счет регистрации вторичного излучения (нейтронов, γ -излучения) при облучении потоком высокоэнергетических фотонов (15 – 25 МэВ) от конверсионной мишени на выходе ЛУЭ широко известно [1]. Поскольку энергия электронов должна быть выше энергии фотонов (из-за спадающего характера энергетического спектра) она должна составлять не менее (30 – 60) МэВ. Широкое внедрение данного фотоядерного метода сдерживается недостаточной эффективностью преобразования энергии «электрон-фотон» в конвертере и необходимостью использования громоздких коллиматоров (весом в десятки тонн).

В данной работе излагается суть метода, позволяющего обойтись без громадных коллиматоров и повысить эффективность преобразования «электрон-фотон» за счет вывода пучка электронов в атмосферу и транспортировки его в воздухе с помощью направленного потока электромагнитного излучения (ЭМИ) специальной конфигурации (трубчатой формы). При этом поток зондирующего тормозного излучения (ТИ) формируется в воздухе при торможении электронов на атомах и молекулах воздуха. Если для излучения на расстоянии (300 –

500) метров от ЛУЭ пучка ТИ известным способом при диаметре на мишени $\sim(3 - 5)$ метров до 90% (и более) фотонов теряется в коллиматоре, то в рассмотренном варианте пучок электронов с энергией (20 – 50) МэВ проходит в воздухе до $\sim(120 - 150)$ метров, сохраняя размер не более (2 – 3) м, что позволяет получить на мишени поток фотонов размером (3 – 5) м с интенсивностью, на порядок превышающей полученные в известном варианте. Требуемая мощность ВЧ-генератора, обосновывающая фокусировку электронного пучка, составляет не более (25 – 30)% от общей мощности ВЧ-питания (ЛУЭ+ВУ) (ВУ – выходное устройство на основе генератора ЭМИ). Схема устройства показана на рис. 1.

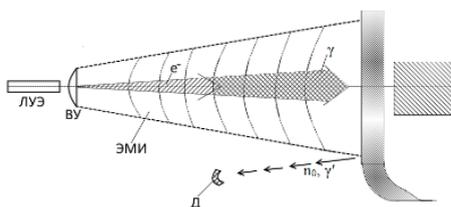


Рис. 1. Схема устройства. Здесь обозначены: Д – детектор нейтронов (вторичного γ' -излучения), e^- – электроны ЛУЭ, γ – фотоны, первично образованные электронами ЛУЭ.

Пучок фотонов образуется в так называемой «дальней» зоне, отстоящей от антенны-излучателя на расстояние, значительно (как минимум на порядок) превышающей диаметр антенны (~ 2 метра) оказывается в поле, аналогичном полю излучения электрического вибратора вдоль его оси (симметрично отрицательно оси антенны) [2]. Подбор фазы влета сгустков электронов в поле такого типа обеспечивает его устойчивое движение (фокусировку) даже при скольжении электронов относительно волны ЭМИ на расстоянии до практически полного торможения.

Расчет проводился по методике, используемой для анализа динамики пучков при транспортировке в газе с использованием уравнений движения в центральных полях в двухмерной модели [3].

Список литературы

1. Б.Ю. Богданович, А.В. Нестерович и другие. Дистанционный радиационный контроль с линейными ускорителями: в 2 т. Т. 2: Комплексы радиационного контроля. М.: Машиностроение, 2012. – 284 с.
2. В.В. Никольский, Т.И. Никольская. Электродинамика и распространение радиоволн. Editorial URSS. 2017. 544 с. С. 202.
3. А.И. Ахизер. Вопросы динамики и устойчивости движения заряженных частиц в ЛУ. В книге «Теория и расчет ЛУ». – М.: Атомиздат. 1962 г. Стр. 38.

А. А. МАЛЫШЕВ^{1,2}, П. А. ФЕДИН¹, В. С. СКАЧКОВ¹,
А. В. ЗИЯТДИНОВА¹, А. В. КОЗЛОВ¹, Т. В. КУЛЕВОЙ^{1,2}
¹ФГБУ «Институт теоретической и экспериментальной физики» имени
А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский
институт», Москва, Россия
²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТА-СЕПАРАТОРА ДЛЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ПУЧКОВ

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ ведутся работы по изучению радиационной стойкости новых материалов в имитационных экспериментах на ионных пучках. Для моделирования влияния продуктов ядерных реакций на свойства исследуемых материалов требуется проведение облучений с использованием двух пучков – тяжелых для генерации дефектов и легких (водород и гелий) для имплантации в область формирования дефектов. В работе представлены результаты разработки магнита-сепаратора.

A. A. MALYSHEV^{1,2}, P. A. FEDIN¹, V. S. SKACHKOV¹,
A. V. ZIATDINOVA¹, A. V. KOZLOV¹, T. V. KULEVOY^{1,2}
¹Institute of Theoretical and Experimental Physics named by A.I. Alikhanov of
National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia
²National Research Nuclear University «MEPHI», Moscow, Russia

DESIGNING SEPARATION MAGNET FOR IMITATION EXPERIMENTS USING TWO ION BEAMS.

Imitation experiments by exploring of radiation resistance of new steel materials are running in Institute of Theoretical and Experimental Physics named by A.I. Alikhanov of National Research Centre «Kurchatov Institute». For modeling influence of nuclear reaction products on properties of exploring materials irradiation by two ion beams is needed. The heavy ion beam is used for generation defects in material and the light ion beam (Hydrogen and Helium) is used for generation radiation effects in defect region. This article shows the results of separation magnet designing.

В НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ для проведения экспериментов по имитации нейтронного повреждающего воздействия в образцах реакторной стали используется линейный ускоритель тяжёлых ионов ТИПр, который способен ускорять пучки ионов тяжёлых металлов с отношением массы иона к зарядности 60, до полной

энергии 101 кэВ/нуклон [1]. Источником ионов железа Fe^{2+} является вакуумно-дуговой источник ионов металлов (ВДИИМ) [1]. Для моделирования влияния продуктов ядерных реакций на свойства исследуемых материалов требуется введение в область формирования дефектов лёгких ионов, что достигается созданием второго канала (рис.1 (а)) для ускорения и транспортировки этих ионов до облучаемой мишени. Для проведения экспериментов выбраны следующие диапазоны изменения энергии: для пучка He^+ - от 100 до 300 кэВ, для пучка H^+ - от 50 кэВ до 150 кэВ [2]. Для данной цели был выбран угол 30° между линиями пучка Fe^{2+} и He^+/H^+ с поверхностью мишени, повернутой на 15° относительно обеих осей пучков [2]. Из полученного пучка магнитным масс сепаратором (рис.1 (б)) выбираются ионы, требуемые для эксперимента, которые ускоряются электростатическим полем и направляются на облучаемую мишень. В качестве среды моделирования использовался пакет CST EM Studio. Был разработан алгоритм параметризации ключевых характеристик дипольного магнита, к которым в том числе относятся радиус поворота, межполюсный зазор, угол поворота и угол скоса полюса, геометрические размеры элементов магнита. Было получено трёхмерное распределение магнитного поля (рис.1 (в)) и оценена его область однородности с допуском на неоднородность 0,5%. Значение магнитного поля в зазоре составило 79,7 мТл.

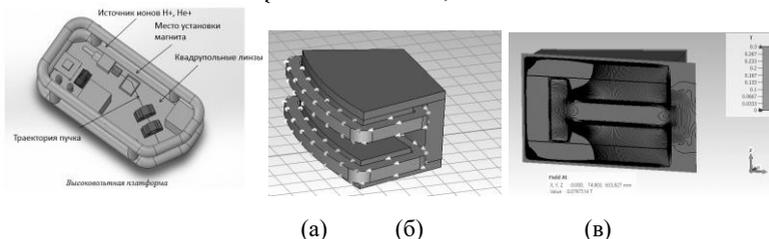


Рисунок 1 – Модель высоковольтной платформы для второго канала облучения (а), модель магнита-сепаратора (б), распределение магнитного поля по конструкции магнита (в)

Список литературы

1. Fedin P, Simulation of irradiation effects with ions on the RFQ linac HIPr // IOP Science
2. Fedin P, Requirements for the dual Fe + H/He beam at the accelerator HIPr for simulation of neutron influence on nuclear reactor materials // IOP Science

Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, Г.О. БУЯНОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МАЛОЙ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТЬЮ

В данной статье изложен принцип получения пучка тормозного излучения с малой угловой расходимостью, в системе конструктивно близкой к синхротрону. Описан принцип работы данной системы.

B. YU. BOGDANOVICH, G.O. BUYANOV, A.V. NESTEROVICH
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

BREMSSTRAHLUNG FORMATION SYSTEM WITH LOW ANGULAR DIVERGENCE

This article describes a principle of obtaining the bremsstrahlung beam with a small angular divergence, in a system structurally close to a synchrotron. The principle of operation of this system is described.

Принцип получения пучка тормозного излучения (ТИ) с малой угловой расходимостью заключается в многократном прохождении пучка электронов через тонкий конвертер (фольгу) при «охлаждении» пучка электронов между конвертерами за счет его фокусировки перед входом в каждый конвертер [1]. Это обеспечивает минимизацию углового разброса электронов в пучке и, тем самым, углового разброса фотонного потока.

В данной работе рассмотрена система на выходе линейного циклического ускорителя электронов на энергию несколько десятков (сотен) МэВ, содержащая кольцевую вакуумную камеру (рис.1), помещенную в магнитную камеру, во многом аналогичную циклическому ускорителю типа синхротрона, но имеющую некоторые принципиальные отличия.

Суть работы устройства заключается в том, что пучок электронов при каждом прохождении через тонкий конвертер излучает фотоны в угол $\langle \theta_\phi \rangle \approx \frac{E_0}{E}$ [2], где $E_0=0.511$ кэВ – энергия покоя электрона, E – энергия электрона. Выходя из конвертера, пучок попадает в ускоряющую систему, компенсирующую потери энергии (в среднем) в фольге, так что при входе в ту же фольгу на следующем обороте энергия пучка практически не меняется (или меняется незначительно). Ключевым моментом является фокусировка пучка электронов при

каждом обороте, получивших угловой разброс после каждого прохождения через фольгу.

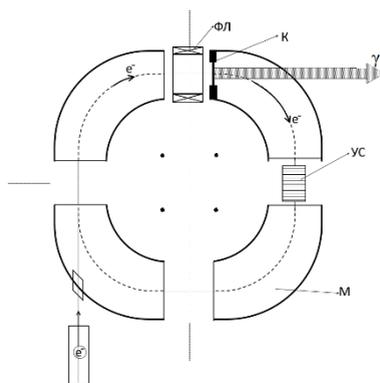


Рис. 1. Схема излучения пучка ТИ с малой расходимостью. М – поворотный магнит; К – конвертер; ФЛ – фокусирующая линза; УС – ускоряющая секция.

Размер пучка при каждом обороте возрастает, так что, в конце концов, он высаживается на коллимирующей диафрагме (имеющей толщину полного поглощения для энергии ЛУЭ-инжектора). Таким образом, может быть реализован режим, определяющий преобразование как трансформацию энергии, полученной в УС, в энергию электронов, а затем – в ТИ и нагрев фольги. В принципе, не исключен случай, когда эта энергия больше, чем энергия пучка при инъекции в ВУ.

Магниты могут быть выполнены на основе постоянных магнитов с магнитопроводами. Ввод пучка может осуществляться известным способом (СВЧ-дефлекторы). Фокусировка может обеспечиваться специальной конфигурацией полюсных наконечников, как при «мягкой» фокусировке в циклических ускорителях, или магнитными линзами.

Список литературы

1. Б.Ю. Богданович, А.В. Нестерович и другие. Дистанционный радиационный контроль с линейными ускорителями: в 2 т. Т. 2: Комплексы радиационного контроля. М.: Машиностроение, 2012. – 284 с.
2. В.П. Ковалев. Вторичные излучения ускорителей электронов. - Москва: Атомиздат, 1979. - 198 с. : ил.; 22 см. Стр. 7.
3. А.Н. Лебедев А.В. Шальнов. «Основы физики и техники ускорителей: Учеб. Пособие для вузов. В 3-х томах. Т.2 Циклические ускорители». - М.: Энергоиздат, 1982.— 240 с, т. 1.

Ю.Д. КЛЮЧЕВСКАЯ, С.М. ПОЛОЗОВ

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

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЧ-ФОТОПУШКИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ-ИНЖЕКТОРА ПРОЕКТА ИССИ-4

Целью работы было исследование динамики электронного сгустка в СВЧ-фотопушке на основе 3,5-, 5,5 - и 7,5-ячеечной π -модовой ускоряющей структуры на стоячей волне. Фотопушка предназначена для линейного ускорителя-инжектора Специализированного источника синхротронного излучения 4го поколения ИССИ-4. В докладе рассматриваются результаты моделирования электродинамических характеристик и оценки влияния нагрузки током на амплитуду поля и динамику пучка. Исследование динамики пучка проводилось с использованием программы BEAMDULAC-BL, разработанной на кафедре ЭФУ НИЯУ МИФИ [1].

YU.D. KLIUCHEVSKAIA, S.M. POLOZOV

National Research Nuclear University MEPHI

OPTIMAL RF-PHOTOGUN PARAMETERS FOR THE NEW INJECTION LINAC FOR SSRS-4 PROJECT

The beam dynamics analysis for the new RF-photogun of Russian 4th generation light source SSRS-4 was done to chose the optimal length of the section and cell's number and also to define optimal accelerating gradient and injection phase. The simulation of electrodynamic characteristics and fields distribution in the RF-gun based on 3.5-, 5.5- and 7.5-cell π -mode standing wave accelerating structure was done. The influence of the beam loading effect on the field amplitude and beam dynamics was the main purposes of study also. The beam dynamics simulation results will present in the report and optimal RF-gun parameters will discuss [2].

Было выполнено численное моделирование динамики пучка с интенсивностью 250 пКл/сгусток при длительности 10 пс в СВЧ-фотопушке. Для достижения минимального энергетического спектра была выполнена оптимизация параметров нескольких вариантов фотопушки (1,5-, 3,5-, 5,5- и 7,5-ячеечные). Результаты моделирования представлены в таблице 1 и на рисунке 2. Из приведенных результатов видно, что 5,5-ячеечная фотопушка обеспечивает необходимое минимальное значение энергетического спектра для сгустков с зарядом 250 пКл/сгусток и длительностью 10 пс.

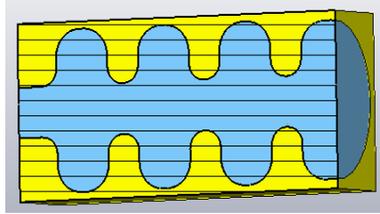


Рис.1. Общий вид 3,5-ячеечной структуры фотопушки.

Таблица 1. Результаты динамики пучка с учетом нагрузки током,
 $I=20A$

п/п	Напряженность поля E , кВ/см	Число ячеек	Оптимальная фаза инжекции, рад	Макс. энергия, МэВ	Спектр пучка, $\frac{\delta W}{W}$, %
1	600	3,5	2,0	6,2	1,8
2	600	5,5	2,7	8,1	0,9
3	700	5,5	2,8	8,2	1,2
4	600	7,5	2,7	4,8	2,2
5	600	7,5	2,5	4,8	2,0

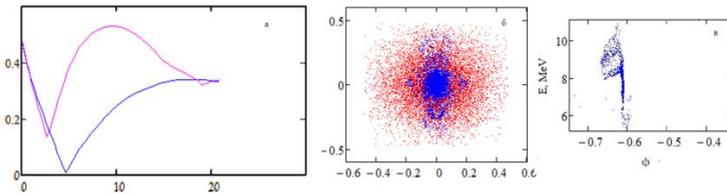


Рис.2 Огибающая пучка (а), поперечное сечение (б), продольный эмиттанс (в)

Список литературы

1. Bondarenko T.V., Masunov E.S., Polozov S.M.. 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. Ashanin I.A. , Kliuchevskaia J.D., Polozov S.M Beam Dynamics Simulation Results in the 6 GeV Top-Up Injection Linac of the 4th Generation Light Source USSR, Proceedings, 26th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2018), p. 285-288.

Е.А. ВОЙНОЛОВИЧ, С.Д. СУПРУН, А.А. ЛЕПЕТЮХА
*Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И.
Алиханова, Москва, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В МОДУЛЯТОРЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

В данной работе рассмотрена схема модулятора [1] на основе искусственных длинных линий, питающего триодный автогенератор, который создаёт ВЧ-поле частотой 27 МГц в резонаторе линейного ускорителя тяжелых ионов ТИПр-1. Данный ускоритель обеспечивает облучение образцов конструкционных материалов ядерных и термоядерных энергетических установок пучками тяжелых ионов в рамках имитационных экспериментов проводимых в Институте Теоретической и Экспериментальной физики (ИТЭФ). В статье представлены результаты работ по увеличению частоты следования импульсов, создаваемых модулятором. Данные улучшения позволяют сократить время набора дозы радиационных повреждений исследуемых материалов под воздействием ионного пучка. В работе представлены расчёты зарядки длинной линии и времени импульса модулятора. Представлены осциллограммы до и после модернизации, полученные в ходе работы ускорителя, свидетельствующие об увеличении длительности импульса модулятора. Приведены результаты моделирования формирования импульса модулятора на нагрузке в среде Simulink.

E.A. VOINOLOVICH, S.D. SUPRUN, A.A. LEPETUKHA
*Institute for Theoretical and Experimental Physics named after A.I. Alikhanov,
Moscow, Russia*

RESEARCH OF PROCESSES IN THE MODULATOR AND IMPROVEMENT OF IT'S CHARACTERISTICS

A scheme of a modulator [1] based on artificial long lines is presented in this paper. The modulator feeds a triode self-oscillator, which creates a high-frequency field with a frequency of 27 MHz in the resonator of the TIPr-1 heavy ion linear accelerator. This accelerator provides irradiation of samples of structural materials of nuclear and thermonuclear power plants with beams of heavy ions in the framework of simulation experiments carried out at the Institute of Theoretical and Experimental Physics (ITEP). The article presents the results of work on increasing the pulse repetition rate generated by the modulator. These improvements make it possible to reduce the time required to acquire a dose of radiation damage to the materials under study under the influence of an ion beam. Calculations of long line charging and modulator pulse time are presented. Also shown are the oscillograms obtained during the operation of the accelerator, before and after the upgrade. They indicate an

increase in the pulse duration of the modulator. The results of simulation of the modulator pulse formation on load in the Simulink environment are presented.

Для уменьшения времени набора дозы при проведении имитационных экспериментов, ведущихся на ускорителе ТИПр-1, производилась модернизация модулятора. Проблема заключалась в том, что использовавшиеся конденсаторы имели номинальную частоту 1/15 Гц [2], тем самым ограничивая частоту посылов импульсов. Замена на конденсаторы частотой посылов 200 Гц [2] позволяет модулятору работать с частотой равной 0,5 Гц и более с амплитудой импульса от 18 кВ до 26 кВ.

Рассмотрен принцип работы модулятора на основе двух последовательно соединённых искусственных длинных линий каждая из которых состоит из 7 ячеек, представляющих собой LC-цепь (Рис.1). Из представленных значений был произведён частотный расчёт работы модулятора, а также генерируемая им длительность импульса.

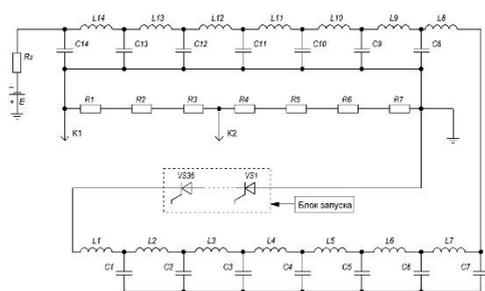


Рис. 6. Принципиальная схема модулятора.

Для ускорения ионов железа Fe^{2+} используется импульс амплитудой 18 кВ. Чтобы зарядить линию до этого напряжения с частотой 0,5 Гц и зарядным сопротивлением 90 кОм необходимо использовать питающее напряжение равное 24 кВ.

В среде моделирования Simulink была реализована схема данного модулятора. В результате были получены временные диаграммы генерируемого импульса с параметрами линии до и после модернизации. В последнем случае выявилось рассогласование длинной линии и нагрузки.

Список литературы

1. Vengrov R.M., Zvyagintsev V.L., Kuzmichev V.G., Lyakin D.A.// Development of a high-frequency supply system for a linear heavy ion accelerator. Moscow. 2000. P. 10
2. ELECTRIC CAPACITORS and CAPACITORS REFERENCE GUIDE Under the general editorship of Doctor of Technical Sciences G.S.Kuchinsky

М.А. ГОРБУНОВ¹, А.В. ИЛЬИНСКИЙ², Р.П. ПЛЕШАКОВА²,
В.Г. ЦЕЙТЛИН², А.Е. ШИКАНОВ¹, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ

²Институт геофизических и радиационных технологий МАН ВШ, Москва, РФ

О СТАТИСТИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В УСТРОЙСТВАХ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА БАЗЕ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Рассмотрены вопросы контроля временных режимов формирования радиационных полей в аппаратно - методических комплексах (АМК) ядерного дистанционного контроля различных объектов на базе малогабаритных нейтронных генераторов (НГ), работающих в импульсно- периодическом режиме.

М.А. GORBUNOV¹, А.В. ILYINSKIY², R.P. PLESHAKOVA²,
V.G. TSEITLIN², A.E. SHIKANOV¹, E.Y. SHKOLNIKOV¹.

¹National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

²Institute for Geophysics and Radiation Technology IAS HE, Moscow, Russia

ON THE STATISTICAL ANALYSIS OF THE FORMATION OF RADIATION FIELDS IN REMOTE CONTROL DEVICES BASED ON PULSED NEUTRON GENERATORS

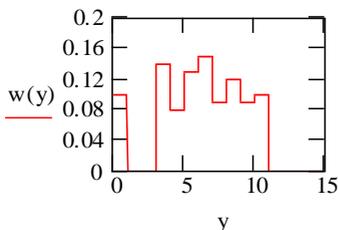
The issues of monitoring the time modes of radiation field formation in the hardware and methodological complexes (AMC) of nuclear radiation monitoring of various objects based on small - sized neutron generators (NG) operating in the pulse - periodic mode are considered.

Временные режимы формирования радиационных полей в приборах дистанционного контроля на базе импульсных НГ с запаянными ускорительными трубками (УТ), определяются генеральным массивом G случайных чисел N_i , $i=\{1,2,3,\dots\}$, означающих полное число нейтронов излучаемых за нейтронную вспышку с номером i или полное число нейтронов или γ - квантов, образуемых на выходе системы регистрации АМК после взаимодействия нейтронов с объектом контроля. Указанное генеральное множество может порождать серию из K выборок в виде совокупности случайных чисел, задаваемых соотношением:

$$B(K, j) = \sum_{i=(j-1)K}^{jK} B_i, j = \{1,2,3,\dots\}, \cdot$$

означающих выход нейтронов или γ - квантов в j -й серии срабатываний УТ. Множество этих чисел обладает более высоким уровнем детерминированности.

На рисунке приведена типичная диаграмма распределения числа нейтронных всплесков по результатам измерения нейтронного выхода УТ, полученным на амплитудном анализаторе при испытании НГ на базе УТ с вакуумно- дуговым источником дейтронов. Аналог подобного НГ описан в работе [1].



Пример диаграммы распределения числа нейтронных всплесков в зависимости от результата измерения нейтронного выхода УТ за одно срабатывание (массив G чисел $N_i=B(1,i)$), нормированной на 1. Горизонтальная ось соответствует переменной $y=10^8 N$, где N - число нейтронов, излучаемых в полный телесный угол за одно срабатывание УТ

Статистический анализ [2] структуры массива G позволил получить функцию распределения его элементов по нейтронному выходу (континуальный аналог диаграммы $w(y)$), с учетом ошибки измерений x , распределенной по Гауссу:

$$P(y, x|K) = q\delta(y) + \frac{10^8(1-q)}{\sqrt{2\pi\sigma(K)[B_2(K) - B_1(K)]}} \Pi(y, K) \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma(K)^2}\right], \quad (1)$$

где q - доля несрабатываний УТ, $\delta(y)$ - функция Дирака, $B_{1,2}(K)$ - нижняя и верхняя границы множества G , $\Pi(y, K) = \Phi[y - 10^{-8} B_1(K)]\Phi[10^{-8} B_2(K) - y]$, $\Phi(z)$ – функция Хевисайда, $\sigma(K)$ - параметр определяемый в процессе калибровки систем регистрации с использованием стандартных ампульных полоний или плутоний – бериллиевых источников нейтронов. Аналогичные эксперименты были проделаны с УТ на базе лазерного источника ионов и источника Пеннинга [3,4]. В результате их статистического анализа также были получены распределения вида (1), при $q=0$, ввиду отсутствия несрабатываний этих УТ.

Помимо оценки фактора нестабильности, знание функции (1) позволяет корректно вычислять поправку показаний системы детектирования АМК на «мертвое время» T , вводя коэффициент пересчета по формуле:

$$\chi = \langle n \rangle / \langle m \rangle \approx (1 - \langle m \rangle T)^{-1},$$

где $\langle m \rangle$ и $\langle n \rangle$ - фиксируемый и скорректированный потоки событий на выходе систем детектирования, усредненные по распределению вида (1).

Список литературы

1. Бессарабский Ю.Г. и др. ПТЭ, №5, 1994, с.206-207.
2. Худсон Д. Статистика для физиков. М., МИР, 1970, с. 27-89.
3. Шиканов А. Е. АЭ, т.63, в.1, 1987, с. 33-39
4. Гулько В.М. и др. АЭ, т.71, в.2, 1991, с.156-159.-

М.А. ГУСАРОВА¹, М.В. ЛАЛАЯН¹, Р.Е. НЕМЧЕНКО¹,
С.М. ПОЛОЗОВ¹, А.В. БУТЕНКО², Е.М. СЫРЕСИН²,
Д.С. БЫЧЕНОК³, С.А. МАКСИМЕНКО³, В.Г. ЗАЛЕССКИЙ⁴,
В.С. ПЕТРАКОВСКИЙ⁴, И.Л. ПОБОЛЬ⁴, А.И. ПОКРОВСКИЙ⁴,
А.А. ШВЕДОВ⁴, С.В. ЮРЕВИЧ⁴

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

²*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

³*Научно-исследовательское учреждение "Институт ядерных проблем" Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь*

⁴*Государственное Научное Учреждение "Физико-Технический Институт Национальной Академии Наук Беларуси", Минск, Беларусь*

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПРОЕКТА НУКЛОТРОН-NICA

Доклад посвящен обзору текущего состояния работ по созданию сверхпроводящих (СП) ускоряющих резонаторов для нового линейного ускорителя (ЛУ) инжекционного комплекса проекта Нуклотрон-NICA (ОИЯИ, Дубна, Россия).

М.А. GUSAROVA¹, М.В. LALAYAN¹, R.E. NEMCHENKO¹,
S.M. POLOZOV¹, А.В. BUTENKO², Е.М. SYRESIN²,
D.S. BYCHANOK³, S.A. MAKSIMENKO³, V.G. ZALESSKIY⁴,
V.S. PETRAKOVSKIY⁴, I.L. POBOL⁴, А.И. POKROVSKIY⁴, А.А.
SHVEDOV⁴, S.V. YUREVICH⁴,

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

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

³*Research Institute for Nuclear Problems Belarusian State University, Minsk, Belarus*

⁴*Physical-Technical Institute, Minsk, Belarus*

METHODICAL ERRORS CAUSED BY SUPERPOSITION OF ELECTRICAL AND OPTICAL SIGNALS IN A HETERODYNE LASER INTERFEROMETER

The report is devoted to a review of the current state of work on the development of superconducting (SC) accelerating resonators for a new linear accelerator of the injection complex of the Nuclotron-NICA project (JINR, Dubna, Russia).

Модернизация инжекционного комплекса Нуклотрон-NICA предполагает замену действующего ускорителя ЛУ-20 на новый ЛУ,

обеспечивающий энергию 30 МэВ для протонов и $\geq 7,5$ МэВ/нуклон для пучка дейтерия, в том числе включающего группу сверхпроводящих резонаторов. Работы по созданию СП 325 МГц резонаторов на основе полуволновых линий ведутся с 2015 года в рамках российско-белорусского сотрудничества [1 – 5] ключевая задача которого – развитие технологий высокочастотной сверхпроводимости в России и Республике Беларусь.

В 2020 году полностью завершено изготовление медного прототипа полуволнового резонатора на 325 МГц с двойными стенками. На рисунке 1а представлена фотография медного прототипа резонатора в кожухе. На этапе прототипирования кожух изготавливался из меди. Для прототипа проведены измерения рабочей частоты, которые показали согласование с расчётной частотой в пределах нескольких единиц Гц. Это говорит о высоком качестве производства и сборки. В конце 2020 года начато изготовление ниобиевого резонатора. На сегодняшний день изготовлены все детали первого тестового ниобиевого резонатора. Резонатор собран на специализированном стенде, обеспечивающем плотное прилегание всех деталей, как показано на рисунке 1б. Завершение изготовления и тестирование полуволнового сверхпроводящего резонатора запланировано на лето 2021 года.



(а)



(б)

Рис. 1. Полуволновые резонаторы 325 МГц:
 (а) медный прототип резонатора с криостатирующим кожухом;
 (б) ниобиевый резонатор на этапе изготовления.

Список литературы

1. G.V. Trubnikov, T.V. Kulevoy, S.M. Polozov et al., PEPAN Letters, 13, 7, 943-946 (2016)
2. G.V. Trubnikov, T.V. Kulevoy, S.M. Polozov et al., in Proc. IPAC'16, pp. 941-943.
3. M. Gusarova, T. Kulevoy, M.V. Lalayan et al., in Proc. Ru-PAC'16, pp. 273-275.
4. D.V. Surkov, M.A. Gusarova, M.V. Lalayan et al., in Proc. IPAC'17, pp. 1058-1060.
5. M.A. Gusarova, D.V. Surkov, K.V. Taletskiy et al., in Proc. SRF'17, pp. 125-127.

S. BILANISHVILI

INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), LNF (Laboratori Nazionali di Frascati) Frascati, Italy

PROPOSAL OF A CAVITY BPM FOR EUPRAXIA@SPARC_LAB PROJECT

The EuPRAXIA@SPARC_LAB is a project to upgrade the SPARC_LAB (Frascati, Italy) to a soft X-ray user facility based on plasma acceleration and high-gradient X-band accelerating structures. The control of the charge and the trajectory at a few pC and few μm is mandatory in this machine, especially in the plasma interaction region. Since one of the most crucial parameters is the device length, it will be convenient for such a system that length to be as short as possible. As a possible solution, a cavity beam position monitor (cBPM) is proposed.

This report describes a possible option for a dual-resonator cavity BPM pickup with a 15 mm beam pipe aperture to be used in the EuPRAXIA@SPARC_LAB project [1]. The plasma wake field acceleration module of the project provides single shot bunch carrying 30-200 pC with a repetition rate of 10-100 Hz. For this reason, a quality factor of the order of $Q_L=450$, that means induced signal decay time $\tau \approx 28$ ns, was considered reasonable for both resonators of the pickup. The working frequency of both resonators has been chosen to be 5.1 GHz.

The cavity operating mode used for the position measurement is TM110, which actually is comprised of two degenerate modes of the same frequency, one for the X plane and one for the Y plane. The modes are coupled out by two coaxial couplers per plane, where the signal is proportional to the product of charge carried by the bunch and the position offset of the bunch in the corresponding plane. Since the beam is a very broadband RF source, it drives also other cavity modes. In particular, the monopole modes, that are insensitive to the beam position, have the highest beam coupling impedance [2].

The four waveguides couple the cavity resonant modes out to the coaxial ports. The waveguide geometry has been designed to optimize the coupling between the waveguide TE010 mode and the cavity TM110 working mode and to reduce the coupling with the cavity monopole modes. Thus, the waveguides are a first-stage filter of the common-mode coupling. A second stage filtering is done in the BPM electronics with passband filters, as the frequency distance between the working mode and the closest monopole mode (TM010) is larger than 1 GHz.

To maximize the monitor sensitivity for the presently considered BPM prototypes different position cavity gaps were simulated, as a result, the gap was chosen to be 5mm also with extending the waveguide width, therefore

Г.Б. ШАРКОВ¹, А.С. КУХАРЕНКО¹, А.В. САВЧУК¹,
В.В. ГУДКОВ¹, Д.И. ИЩУК¹, А.Г. ИЛЮШИН¹,
М.С. ДМИТРИЕВ², М.В. ЛАЛАЯН², М.А. ГУСАРОВА²,
Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ^{1,2}, Т.А. ЛОЗЕЕВА^{1,2}, В.Г. КУЗЬМИЧЕВ³,
Д.А. ЛЯКИН³, А.Л. СИТНИКОВ³, Т.В. КУЛЕВОЙ³

¹ АО «НИИТФА», Москва, Россия;

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

³ НИЦ КИ – ИТЭФ, Москва, Россия

УНИФИЦИРОВАННАЯ ЛИНЕЙКА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ 40, 81 И 162 МГц ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЛЁГКИХ И ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ

Рассмотрено научно-техническое обоснование унификации разработки линейки ВЧ усилителей широкого спектра мощностей на рабочих частотах 40.625, 81.25 и 162.5 МГц для линейных ускорителей ионов, разрабатываемых НИЦ КИ – ИТЭФ и НИЯУ МИФИ. Основываясь на модульной архитектуре твердотельных усилителей АО «НИИТФА», предлагается создать 12 типов усилителей, имеющих общие схемные и конструктивные решения. Заложённая гибкость и модульность архитектуры позволяет сократить ресурсы на разработку и обеспечить совместимость усилительных блоков для обоих ускорителей.

G.B. SHARKOV¹, A.S. KUKHARENKO¹, A.V. SAVCHUK¹,
V.V. GUDKOV¹, D.I. ISHCHUK¹, A.G. ILYUSHIN¹,
M.S. DMITRIEV², M.V. LALAYAN², M.A. GUSAROVA²,
YU.YU. LOZEEV^{1,2}, T.A. LOZEEVA^{1,2}, V.G. KUZMICHEV³,
D.A. LYAKIN³, A.L. SITNIKOV³, T.V. KULEVOY³

¹ SC "NIITFA" Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

³NRC KI – ITEP, Moscow, Russia

UNIFIED LINE OF SOLID-STATE RF AMPLIFIERS 40, 81 AND 162 MHZ FOR LIGHT AND HEAVY ION LINACS

The design and technical feasibility of unified RF amplifiers line with wide spectrum of output powers and working frequencies of 40.625, 81.25 and 162.5 MHz are considered. The design is made for ion linacs, being developed by MEPHI and ITEP. The design of 12 types of amplifiers with common schematic and mechanic solutions is based on NIITFA's modular solid-state architecture. Versatility and modular approach allows to reduce the R&D costs and provide compatibility of amplifier modules for both linacs.

В НИЦ КИ – ИТЭФ разрабатывается линейный ускоритель тяжёлых ионов, состоящий из источника ионов, структуры RFQ, секций с трубками дрейфа DTL-1, DTL-2 и согласующих каналов. В то же время, в НИЯУ МИФИ ведётся разработка линейного ускорителя лёгких ионов. Оба проекта требуют в сумме 96 ВЧ усилителей. В таблице 1 приведён список усилителей с их рабочими частотами и мощностями. Как видно из таблицы, используются три кратные рабочие частоты: 40.625, 81.250 и 162.5 МГц; при этом мощности варьируются от 5 до 240 кВт.

Таблица. 1. Список усилителей, необходимых для линейных ускорителей, разрабатываемых МИФИ и ИТЭФ

Заказчик	Рабочая частота, МГц	Выходная импульсная мощность, кВт
МИФИ	81.25	50, 150, 200
ИТЭФ	40.625	190
ИТЭФ	81.25	5, 60, 80, 90, 100, 120
ИТЭФ	162.5	120, 160, 180, 200, 220, 240

Для унификации и сокращения затрат на разработку предлагается использовать архитектуру модульных твердотельных усилителей [1], апробированную на усилителе RFA202-250P, который был поставлен АО «НИИТФА» и находится в эксплуатации на линейном ускорителе ISIS лаборатории им. Резерфорда (Великобритания). Базовой единицей в этой архитектуре является блок усилительных модулей, состоящий из 8 модулей и объединителя. Усилительный модуль выходной мощностью 4 или 7 кВт (в зависимости от требований) выполнен в стандарте Евромеханика (МЭК 297). Модули размещаются в сетевых шкафах по 8 штук в корзине высотой 6U. Мощность с этих модулей суммируется с помощью объединителя мощности 8:1. Такая архитектура позволяет разработать требуемую линейку усилителей, варьируя количество модулей, но не меняя их габаритно-присоединительные размеры и интерфейсы. Исполнение для разных частот сводится к изменению топологии плат ВЧ тракта и их компоновке в ВЧ модуле, и подборе сосредоточенных элементов в объединителе. ВЧ модуль рассчитан на скважность до 100 при выходной мощности 7кВт. Это позволяет изготавливать одинаковые модули для ускорителей МИФИ и ИТЭФ.

Ток смещения используемого транзистора, работающего в классе АВ, составляет 300 мА при напряжении 50В. Для экономии потребления электроэнергии между импульсами предложена схема коммутации цепи смещения, которая подаёт напряжение перед каждым ВЧ импульсом по сигналу синхронизации от системы LLRF ускорителя. Для усилителей мощностью более 200 кВт это позволит сэкономить около 2 кВт энергопотребления и упростит охлаждение транзисторов.

Список литературы

1. G.B. Sharkov, R. Cisneros, A.A. Krasnov, R.J. Patrick, and S.A. Polikhov, “100 kW Very Compact Pulsed Solid-State RF Amplifier. Development and Tests”, in Proc. North American Particle Accelerator Conf. (NAPAC'16), Chicago, IL, USA, Oct. 2016, WEB4CO04, pp. 873-876,

В.М. БЕЛУГИН, А.Е. ВАСИЛЬЕВ, Н.Е. РОЗАНОВ

*Московский радиотехнический институт Российской Академии Наук, Москва,
Россия*

**ПРИМЕНЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ
СТРУКТУР В ЛАМПАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ**

Рассмотрены возможности использования относительно крупногабаритных электродинамических структур ламп бегущей волны, использованных для усиления широкополосных относительно низкочастотных сигналов, для усиления относительно высокочастотных сигналов. Цель состоит в снижении требований к допускам на детали электродинамических структур при создании высокочастотных усилителей. Способ состоит в использовании высших по частоте мод электродинамической структуры, а также высших пространственных гармоник электрического поля усиливаемой волны.

V.M. BELUGIN, N.E. ROZANOV, A.E. VASILJEV

Moscow Radiotechnical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**APPLICATION OF LARGE-SIZE LOW-FREQUENCY
ELECTRODYNAMICS STRUCTURES IN TRAVELLING-
WAVE TUBES FOR AMPLIFICATION OF HIGH-
FREQUENCY SYGNALS**

Possibilities of using relatively large-sized electro dynamics structures of travelling wave tubes used for amplification of broadband relatively low-frequency signals for amplification of relatively high-frequency signals are considered. The goal is to reduce the requirements for tolerances for details of electro dynamics structures when creating high-frequency amplifiers. The method consists in using higher frequency modes of electro dynamics structure, as well as higher spatial harmonics of electric field of amplified wave.

Одним из направлений развития СВЧ устройств, таких как ускорители заряженных частиц, лампы бегущей волны, приборы гиротронного типа и другие, является переход к все более высоким рабочим частотам. Преимуществами при этом являются уменьшение габаритов устройств, а также больший объем передаваемой такими СВЧ сигналами информации. Однако в ряде случаев возникают проблемы их практической реализации, обусловленные ужесточением требований к точности изготовления деталей уменьшенных размеров.

Известно, что, в частности, для решения этой проблемы при создании гиротронов применяются так называемые сверхразмерные

резонаторы. Аналогичный способ можно, в принципе, применить и при разработке и изготовлении ламп бегущей волны на высокие частоты. Для этого можно использовать высшие по частоте моды резонатора, а для обеспечения синхронизма пучка с усиливаемой волной - высшие пространственные Флоке-гармоники электрического поля волны.

Проверка такого способа осуществлена, на стадии расчетов, на примере использования замедляющей структуры созданных мощных широкополосных непрерывных ламп бегущей волны [1-3] для усиления сигналов с примерно вдвое большей частотой. Для этого используется вторая по частоте полоса пропускания. А для обеспечения синхронизма усиливаемых волн с пучком примерно той же энергии, что и в работающих лампах бегущей волны, применяется так называемая "+1" пространственная гармоника: вместо обычно используемой "-1" пространственной гармоники в замедляющих структурах типа "цепочки связанных резонаторов". Расчеты показали, что такой способ является вполне работоспособным: коэффициент усиления и выходные мощности имеют приемлемые значения. Длина замедляющей структуры при этом должна быть примерно вдвое больше - вследствие меньших значений сопротивлений связи.

Аналогичный результат можно получить для усиления сигналов с примерно втрое большей частотой. Для этого используется третья по частоте полоса пропускания, работающая на "-2" пространственной гармонике.

Список литературы

1. Белугин В.М., Васильев А.Е., Ветров В.В., Розанов Н.Е. Разработка, методы расчета и создание широкополосных ЛБВ для непрерывного режима работы. Препринт 2005-03. М.: МРТИ РАН, 2005. 20 с. Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 7, 189 (2006).
2. Андреев Н.В., Белугин В.М., Васильев А.Е., Ветров В.В., Розанов Н.Е. Разработка электродинамической системы широкополосных ЛБВ большой мощности. Препринт 2005-04. М.: МРТИ РАН, 2005. 12 с. Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 7, 187 (2006).
3. Белугин В.М., Васильев А.Е., Ветров В.В., Розанов Н.Е. Создание мощных широкополосных ламп бегущей волны для передающих устройств. Препринт 2007-02. М.: МРТИ РАН, 2007. 29 с. Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 5, 40 (2008).

**Н.И. СКРИПКИН, А.В. ШМЕЛЕВ, А.И. ПРОНИКОВ,
И.М. ИВАНОВ**

Акционерное общество «Плутон», Москва, Россия

**КОМПЛЕКСИРОВАННЫЙ СВЧ-МОДУЛЬ С
СИНХРОНИЗИРОВАННЫМИ МАГНЕТРОННЫМИ
ГЕНЕРАТОРАМИ**

В настоящее время в АО «Плутон» создана установка генераторного модуля СВЧ 2-см диапазона длин волн на основе технического решения – способа когерентного суммирования мощностей двух генераторов в волноводном сумматоре мощности – волноводном 3-х децибельном мосте. При этом на выходе модуля синхронизированного устройства мощность в пределах полосы синхронизации может достигать 95% от суммарной мощности генераторов.

**N.I. SKRIPKIN, A.V. SHMELEV, A.I. PRONIKOV,
I.M. IVANOV**

Joint-stock company Pluton, Moscow, Russia

**COMPLEXED RF-MODULE WITH SYNCHRONIZED
GENERATORS M-TYPE**

Currently JSC «Pluton» has developed complexed RF-module in the 2-cm wave-range based on a technical solution – a method of coherent summation of the RF-powers of two generators M-type in a waveguide power combiner – a waveguide 3-dB bridge. The RF-power can reach 95% of the total RF-powers of two generators in output of a synchronized device.

На основании ранее проведенных работ [1,2] установлено, что наиболее эффективным способом для когерентного суммирования мощности двух генераторов с волноводным выводом является использование в качестве сумматора волноводного 3-х децибельного моста. При этом на выходе мощность синхронизированного устройства в пределах полосы синхронизации может достигать 95% от суммарной мощности генераторов. Схема синхронизации представлена на рис.1.

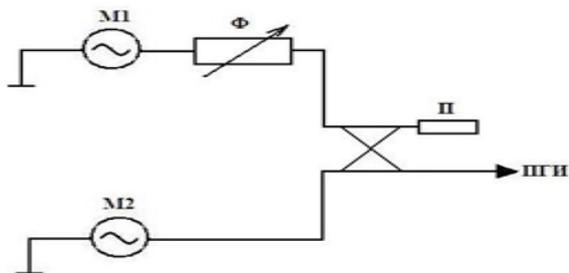


Рис. 1. – Схема синхронизации двух магнетронных генераторов

Взаимная фазированная (синхронизация) двух магнетронов обеспечивается фазовращателем, согласование обеспечивается короткозамыкающим поршнем. Суммированный сигнал направляется в выходной (антенный) тракт РЛС. Генераторный модуль СВЧ предназначен для формирования зондирующих импульсных сигналов в многофункциональном приёмопередающем радиолокационном измерительном комплексе. В табл. 1 представлены рабочие электрические параметры.

Табл. 1 – Полученные рабочие параметры СВЧ-модуля

– Рабочая частота, МГц	15000
– Выходная импульсная мощность, кВт	500
– Частота посылок, Гц	800
– Длительность импульса, мкс	0,6
– Диапазоны регулировки выходной мощности, %	25 – 100
– Охлаждение магнетронов	воздушное принудительное
– Ток анода магнетронов импульсный, А	87
– Напряжение анода магнетронов, кВ	16,0 – 16,2

Список литературы

1. И.М. Иванов, Н.И. Скрипкин, К.В. Ходатаев, А.И. Вагин// СВЧ-электроника, 2015, №6 (00146), стр. 98-104, Экспериментальное исследование самосинхронизации магнетронов 3-миллиметрового диапазона.

2. А. И. Вагин, М. В. Ефремова, И. М. Иванов, А. А. Курушин, Н. И. Скрипкин// СВЧ-техника, 2016, серия 1, №3 (530), стр. 14-19, Расчёт и экспериментальное исследование прототипа излучателя ФАР на синхронизированных магнетронах 3-мм диапазона.

И.В. РЫБАКОВ, Л.В. КРАВЧУК, В.В. ПАРАМОНОВ,
А.В. ФЕЩЕНКО

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

**ПРЕДЛОЖЕНИЕ НОРМАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕГО
РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНОГО
УСКОРИТЕЛЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ
ВОДОРОДА**

На основе ускоряющей структуры Cut Disk Structure (CDS) разработано физическое обоснование ускоряющего резонатора для основной части Линейного Ускорителя (ЛУ) интенсивных пучков ионов водорода до энергий ~ 1 ГэВ. Показано, что по комплексу параметров CDS как минимум не уступает апробированным структурам SCS, ACS, DAW начиная с энергий частиц ~ 100 МэВ, $\beta \sim 0.43$. Приводятся как результаты оптимизации электродинамических характеристик CDS, так и результаты исследований связанных процессов. Обоснованы как выбор допусков при изготовлении, так и методики контроля качества и настройки ячеек. Реализована методика моделирования характеристик ускоряющего резонатора, состоящего из четырех секций CDS, объединенных мостовыми устройствами в единую резонансную систему.

I. V. RYBAKOV, L. V. KRAVCHUK, V. V. PARAMONOV,
A. V. FESCHENKO

Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, Russia

**PROPOSAL OF A NORMAL CONDUCTING CAVITY FOR
THE MAIN PART IN A LINEAR ACCELERATOR OF
INTENSIVE BEAMS OF HYDROGEN IONS**

Basing on the Cut Disk accelerating Structure (CDS) is developed the conceptual design of accelerating cavity for the main part of the linear accelerator of intensive beams of hydrogen ions with energies up to 1 GeV. In the total set of parameters CDS at least not inferior to the proven structures SCS, ACS, DAW even starting from beam energies of ~ 100 MeV, $\beta \sim 0.43$. Both the results of CDS RF parameters optimization and coupled processes study are presented. Tolerances definition, methods for quality control and cells tuning during manufacturing are described. The cavity consists from four CDS sections united by bridge coupling cavities into joint resonant system. The technique for cavity parameters simulations basing on multimode approximation is described.

Структура CDS предложена и апробирована для ускорения частиц высоких энергий с $\beta \sim 1.0$, [1], но ее применение для ускорения протонов начиная с энергии ~ 100 МэВ, $\beta \sim 0.43$ обосновано не было. Обладая, по сравнению с апробированными в ЛУ протонов структурами SCS, DAW,

ACS, Рис. 1, существенно меньшими поперечными размерами, CDS как минимум обеспечивает при изготовлении технологические преимущества.

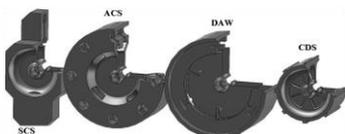


Рис. 1. Эскиз рассмотренных структур на частоте 991 МГц, $\beta \sim 0.43$.

Применимость CDS в ЛУ интенсивных пучков обоснована на примере резонатора из четырех секций CDS и трех мостовых устройств, Рис. 2, эквивалентного по параметрам первому резонатору основной части ЛУ ИЯИ РАН на структуре DAW без измерений в других системах ЛУ.

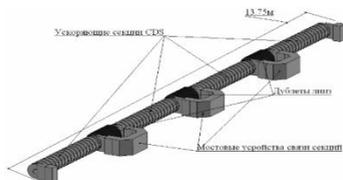


Рис. 2 Эскиз резонатора на основе секций CDS.

В результате оптимизации ВЧ параметров найдена конфигурация ячеек, обеспечивающая не меньшую величину эффективного шунтового сопротивления. Схема каналов охлаждения, исключая паяные соединения вода-вакуум, обеспечивает не большой сдвиг частот при тепловой нагрузке до 6 кВт/м. Достаточный коэффициент связи ячеек, $\sim 16\%$, допускает отклонения в размерах ячеек до 50 мкм при заданной неравномерности распределения ускоряющего поля. Для предотвращения развития мультипакторного разряда в ячейках связи предложено знакопеременное смещение частот соседних ускоряющих ячеек. Предложена методика контроля параметров ячеек при настройке по измерениям как в минимальных сборках, так и в секции в целом.

Программно реализованная методика, на основе многомодового приближения, для моделирования как характеристик резонатора в целом, так и процесса его настройки, изложена в работе [2].

Список литературы

1. V. Paramonov, A. Naboka, A. Donat et al // Proc. LINAC 2010, Japan, pp. 241 – 243.
2. I. Rybakov, V. Paramonov. Proc. RuPAC 2018, p. 301, 2018

В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВАРИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРИТЕЛЯ С СЕКЦИЯМИ НА СТОЯЧЕЙ И БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ

Приведены результаты численного моделирования характеристик ускорителя, включающего секцию на стоячей волне и секцию на бегущей волне с питанием от магнетрона. Получены вариационные характеристики полного набора энергии в ускорителе при изменениях параметров секций на стоячей волне (коэффициента связи с подводющим волноводом, добротности, рабочей частоты), бегущей волне (рабочей частоты), фазового сдвига между секциями. Из вариационных характеристик определены требования к стабильности параметров питания (частоты генератора, точности установки фазового сдвига между секциями).

V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY

National Research Nuclear University «MEPhI»

VARIATION CHARACTERISTICS OF ACCELERATOR WITH STANDING AND TRAVELING WAVE SECTIONS

Characteristics numerical simulation of accelerator including standing wave section and traveling wave section with power feeding by magnetron are presented. Variation characteristics of full energy in accelerator were obtained with changes in the parameters of the sections on standing wave (coupling coefficient with the supply waveguide, Q factor, operating frequency), traveling wave (operating frequency), and phase shift between sections. From variation characteristics, requirements for stability of power feeding parameters (generator frequency, accuracy of setting phase shift between sections) are determined.

Повышение КПД ускорителя со структурой на стоячей волне и питанием от магнетрона через ферритовый циркулятор может быть обеспечено установкой секции на бегущей волне вместо поглощающей нагрузки. Схема такого ускорителя [1], реализующая указанное преимущество, показана на рис.1. В период переходного режима и, при необходимости, стационарного режима энергия, отражённая от секции на стоячей волне, передаётся в секцию на бегущей волне и обеспечивает ускорение частиц.

Представляет значительный интерес рассмотрение вариационных характеристик ускорителя – зависимостей полного набора энергии частиц в обеих секциях – от параметров каждой из секций в переходном и стационарном режимах. В работе проведены расчёты и анализ вариационных характеристик ускорителя при изменениях параметров

секций на стоячей волне (коэффициента связи с подводящим волноводом, добротности, рабочей частоты), бегущей волне (рабочей частоты), фазового сдвига между секциями. Отклонения параметров ускоряющих секций от расчётных значений могут быть обусловлены погрешностями изготовления секций, а также нестабильностями ускоряющего поля при эксплуатации ускорителя. Результатом анализа явилось определение допусков на изменения параметров секций, а также требований к стабильности параметров питающего генератора.

На рис. 2 представлены зависимости отклонения энергии от номинальной от коэффициента связи с подводящим волноводом секции на стоячей волне, на рис. 3 – от фазового сдвига между секциями, на рис. 4 – от частоты питающего генератора. Из приведённых кривых видно, что наиболее критичным параметром является стабильность частоты генератора.

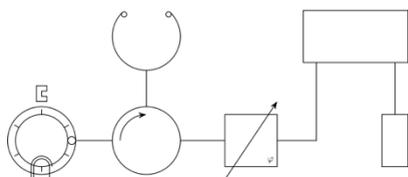


Рис.1.

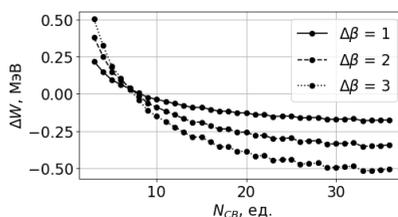


Рис.2.

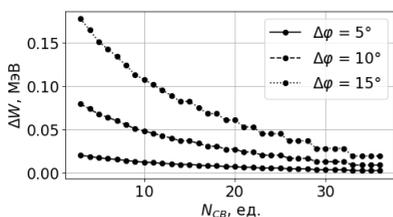


Рис.3.

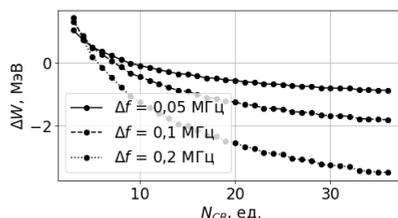


Рис.4.

Список литературы

1. Каминский В.И., Мациевский С.В. Система питания ускорителя с секциями на стоячей и бегущей волне. VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии Лаплаз-2020», Сб. научных трудов, ч.2, М., 2020, с.304 – 305

Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, М.А. ГУЗОВ, А.И. МАКАРОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва,
Россия*

РАЗРАБОТКА УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ПОКФ НА РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЕ 81,25 МГц

В работе представлены результаты разработки четырехкамерного резонатора с ПОКФ на рабочей частоте 81,25 МГц. Произведена настройка электродинамической модели ускоряющей структуры на рабочем виде колебаний, исследованы электродинамические характеристики резонатора, рассчитаны вспомогательные элементы резонатора, произведена оценка допусков на ключевые размеры резонатора и установку электродов.

YU.YU. LOZEEV, S.M. POLOZOV, M.A. GUZOV, A.I.
MAKAROV

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

DESIGN OF 81,25 MHZ RFQ ACCELERATING STRUCTURE

The results on the 4-vane 81,25 MHz RFQ accelerating structure design is presented. The RFQ cavity was tuned to the operating mode, its electrodynamic characteristics were obtained. Some of the auxiliary cavity elements and systems were designed, manufacturing and electrode mounting tolerances were estimated.

В настоящее время ведется разработка импульсного ускорителя ионов с соотношением массы к заряду A/Z до 3,5. В качестве начальной секции во всех подобных ускорителях обычно используется резонатор с ПОКФ (пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой). В данном ускорителе в качестве секции с ПОКФ был выбран четырехкамерный резонатор с рабочей частотой 81,25 МГц с окнами магнитной связи [1]. Такая структура обладает высоким шунтовым сопротивлением и малыми потерями и позволяет получить хорошую сепарацию паразитных дипольных мод.

Проведена настройка данного резонатора на рабочий вид колебаний H_{210} на частоте 81,25 МГц, с помощью оптимизации геометрии торцевых ячеек выровнено распределение электрического поля вдоль оси, изменением радиуса скругления головки электрода получена квадрупольная симметрия электрического поля в области апертуры. С помощью оптимизации геометрии электродов в торцевых ячейках произведено выравнивание потенциалов на концах электродов. Основные параметры и электродинамические характеристики структуры приведены в таблице 1.

Далее были разработаны и рассчитаны вспомогательные элементы конструкции резонатора: статические и динамические элементы подстройки частоты, выбрана геометрия решеток на вакуумных окнах для экранирования электроники насосов от поля резонатора, настроен один из вариантов петли ввода ВЧ-мощности.

Также были исследованы характеристики смещения рабочей частоты резонатора при изменении температуры в ускорительном зале в диапазоне от 20 до 30 °С – максимальный сдвиг частоты составил менее 1 кГц. Получены вариационные характеристики и произведена оценка допусков на ключевые размеры резонатора и установку электродов.

Табл. 1. Основные параметры и электродинамические характеристики ускоряющего резонатора с ПОКФ

Параметр	Значение
Рабочая частота, МГц	81,25
Длина резонатора, м	5,120
Длина электродов, м	5,040
Радиус обечайки, мм	335
Количество секций	7
Длина секции, мм	720
Частота ближайшей дипольной моды,	86,01
Напряжение между электродами, кВ	140
Максимальное значение коэффициента перенапряженности электрического поля на поверхности электродов, k_n	1,86
Собственная добротность	13000
Погонная мощность потерь, кВт/м	45,3
Поперечное шунтовое сопротивление,	42,2

Список литературы

1. Andreev V.A. Structure for accelerating heavy ions with uniformly spaced quadrupole focusing (USQF)// Patent US5483130 (1996).

Г.П. АВЕРЬЯНОВ¹, В.В. ДМИТРИЕВА¹,
А.М. КОНЕВ¹, И.А. КУНОВ¹, Е.М. НОСОВА²

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

²*Московский государственный технический университет гражданской
авиации (МГТУ ГА), Москва, Россия*

ОЦЕНКА ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДАМИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рассматривается проблема оценки паразитных параметров мощных импульсных устройств с распределенными параметрами на основе классификации форм выходных сигналов методами машинного обучения и распознавания образов. Рассмотрено применение линейной регрессии, модель «Случайный лес», метод k-ближайших соседей, одномерная модель сверточной нейронной сети. Дается сравнение производительности каждого подхода, а также варианты их совместного использования.

G.P. AVAVERYANOV¹, V.V. DMITRIEVA¹,
A. M. KONEV¹, I.A. KUNOV¹, E. M. NOSOVA²

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

²*The Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA), Russia*

ESTIMATION THE PARASITIC PARAMETERS OF POWER PULSED DEVICES BY IMAGE RECOGNITION AND MACHINE LEARNING METHODS

The article reviews the problem of detecting parasitic parameters based on the form classification of the output signals of based on machine learning methods and pattern recognition in powerful pulse devices with distributed parameters. Considered the linear regression methods, the "Random Forest" model, the k-nearest neighbors' algorithm, a one-dimensional convolutional neural network model. Comparison of the performance of each approach is given, as well as options for sharing these methods.

Устройства формирования мощных высоковольтных импульсов малой длительности, имеют широкий круг применения в ускорителях и установках мегасайенс класса. Моделирование этих устройств базируется на системах из компонентных и топологических уравнений, одновременно учитывающих элементы с сосредоточенными и распределенными параметрами. Прохождение импульса в сегментах

линии описывается с системой телеграфных уравнений, и решается через рекуррентную конечно-разностную схему (1).

$$(1) \quad \begin{cases} u_{k+1}(t + T_k) + \rho_k i_{k+1}(t + T_k) = (1 - \rho_k g_k) u_k(t) + (\rho_k - r_k) i_k(t) \\ u_k(t + T_k) - \rho_k i_k(t + T_k) = (1 - \rho_k g_k) u_{k+1}(t) + (\rho_k - r_k) i_{k+1}(t) \end{cases}$$

здесь величина тока $-i_{k+1}$ и напряжения $-u_{k+1}$ в секции с номером $(k + 1)$ определяются через величину тока $-i_k$ и напряжения $-u_k$, электрическую длину $-T_k$, сопротивление $-r_k$ и проводимость $-g_k$, вычисленные для предыдущего сегмента линии (с номером k) [1].

Успешное моделирование переходных процессов в схемах формирователей импульсов позволило перейти к задаче обратного моделирования. В этом случае данными являются осциллограммы, показывающие напряжение на нагрузке длинной линии, и могут быть получены сначала на симуляторах, на которых результат легко проверить, а затем и на реальных установках. В ходе работы была оценена работа каждой модели по метрике среднего абсолютного отклонения

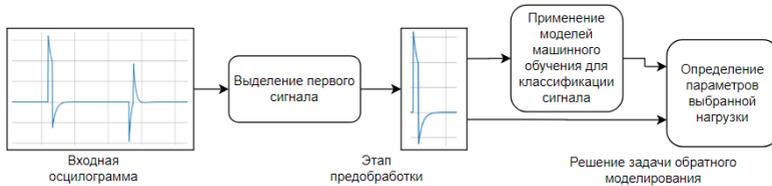


Рис. 1. Схема процесса решения задачи обратного моделирования

Среди рассмотренных методов классификации и регрессии модель сверточной нейронной сети показала наилучший результат. [2]

Список литературы

1. Averyanov G P et al. 2014 (in Russian) Virtual electrophysics laboratories: New generation (Cybernetics and Physics, Vol. 3, No. 4) pp 153 – 156
2. Hastie, T., Tibshirani R., Friedman J. “The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction” 2009

Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, В.Г. КУЗЬМИЧЕВ,
Т.В. КУЛЕВОЙ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»-ИТЭФ

ЭЦР-ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ

В рамках проекта BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator), предназначенного для решения различных задач, создается инжекционный комплекс на базе нескольких ионных источников. Одной из задач является многопучковое облучение конструкционных материалов ядерных и термоядерных энергетических установок для анализа их радиационной стойкости. Тяжелые (Fe) и легкие (H₂/He) ионные пучки будут облучать мишень в одной и той же камере одновременно. Для генерации пучков легких ионов разрабатывается компактный ионный источник на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР источник). Статья содержит описание конструкции ЭЦР- источника легких ионов и предварительные результаты по генерации пучка ионов водорода.

T.V. KULEVOY, V.G. KUZMICHEV, A.B. ZARUBIN,
D. N. SELEZNEV

National Research Center "Kurchatov Institute" -ITEF

ECR SOURCE OF LIGHT IONS

In the framework of the BELA project (Based on ECR ion source Linear Accelerator), an injection complex based on several ion sources is designed for various experimental tasks. One of the tasks is irradiation of structure materials for fusion and fission reactors by several ion beams for the analysis of the material radiation resistance. Heavy (Fe) and light (H₂ / He) ion beams will irradiate the target in the same chamber simultaneously. The article presents a description of the ECR light ion source design and preliminary results of a hydrogen ion beam generation.

Для проведения предаттестационных исследований новых конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов, востребованы методы экспресс-анализа радиационной стойкости этих материалов. Такими методами являются имитационные эксперименты по облучению материалов ускоренными пучками тяжелых ионов. Для полноты воспроизведения процессов, происходящих в материалах ядерных энергетических установок при их эксплуатации, применяют технологию одновременного облучения материала тремя ионными пучками. Ионы Fe используются в качестве основного радиационного дефектообразующего пучка, а ионы водорода и гелия имплантируются в область дефектообразования от основного пучка. Т.к. в реальных условиях нейтронного облучения в результате реакций ядерной

трансмутации в материалах образуются газообразные примеси: гелий и водород, которые накапливаются одновременно с накоплением радиационных дефектов. Поэтому возникла необходимость создания установки для проведения имитационных экспериментов с одновременной имплантацией ионов газов [1]. В НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ ведется разработка такой многофункциональной установки BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator). Эта статья представляет описание ЭЦР ионного источника легких ионов и первые результаты, полученные с водородом.

Структурная схема лабораторного ЭЦР источника ионов представлена на рисунке 1.

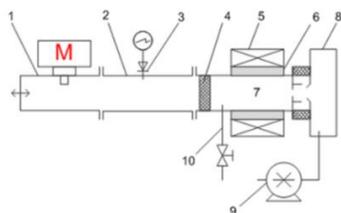


Рис. 1. Схема лабораторного ЭЦР источника ионов: 1-секция с магнетроном; 2- измерительная секция; 3- диодный детектор; 4- вакуумное высокочастотное окно; 5- соленоид; 6- постоянные магниты (Nd₂,Fe₁₄,B); 7- разрядная камера; 8-система экстракции ионов; 9- вакуумный насос; 10- ввод газа.

Основные параметры ионного источника: частота СВЧ колебаний 2,45 ГГц; магнетрон LG 2M213; вид СВЧ колебаний H103; габариты прямоугольного резонатора 72x34x360 мм; рабочий газ водород.

Плазма в разрядной камере генерировалась импульсной СВЧ мощностью с частотой посылок до 2 Гц и длительностью импульса 5 мс. Источник устойчиво работал при давлении в вакуумной камере $p=4 \times 10^{-5}$ Торр несколько часов. Был измерен цилиндром Фарадея полный ток пучка ($I=3$ mA), измерен масс зарядовый состав пучка и исследована зависимость тока компонент пучка от давления газа. Интенсивности ионного пучка, как протонов, так и молекулярных ионов хватает для проведения имитационных экспериментов. Ионный источник планируется использовать в проектах BELA.

Список литературы

1. Fedin P. A. et al. REQUIREMENTS FOR THE DUAL Fe+ H/He BEAM AT THE ACCELERATOR HIPR FOR SIMULATION OF NEUTRON INFLUENCE ON NUCLEAR REACTOR MATERIALS //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1686. – №. 1. – С. 012073

К.Г.АРТАМОНОВ, М.С.ДМИТРИЕВ, М.И.ЖИГАЙЛОВА
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц

Проведено исследование магнитной системы ЭЦР источника плазмы с рабочей частотой 2450 МГц для получения протонов и ионов двухзарядного гелия. Выполнено численное моделирование магнитной системы ЭЦР источника на постоянных магнитах. Предложена возможность перемещения кольцевых магнитов области инжекции и экстракции для настройки значений максимумов магнитного поля B_{inj} и B_{ext} на оси плазменной камеры, а также возможность перемещения брусков секступольного магнита в радиальном направлении для настройки магнитного поля на границе камеры B_{rad} . Для обеспечения возможности работы ЭЦР источника в режиме СВЧ источника предложена конструкция магнитной системы с добавлением соленоидов, обеспечивающих регулировку значений B_{inj} и B_{ext} в необходимых пределах, а также перестройку минимума аксиальной составляющей индукции магнитного поля B_{min} при неизменном положении всех кольцевых магнитов.

M.S. DMITRIEV, M.I. ZHIGAYLOVA, K.G. ARTAMONOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

MAGNETIC SYSTEM WITH VARIABLE CHARACTERISTICS FOR A 2.45 GHz ECRIS

The study of the magnetic system of ECRIS with operating frequency of 2.45 GHz for producing protons and double-charged helium ions has been carried out. Numerical simulation of ECRIS magnetic system based on permanent magnets has been performed. The possibility of shifting the ring magnets in both injection and extraction regions (B_{inj} and B_{ext}) is suggested to adjust maximum and minimum values of the axial distribution of a magnetic field in a plasma chamber. The possibility of shifting the bar magnets of the sextupole is shown to provide the adjustment of the radial magnetic field B_{rad} at the chamber wall. Additional solenoids are introduced to the system for providing the required B_{inj} and B_{ext} adjustment and tuning the axial magnetic field distribution including minimum B_{rad} with the constant position of the ring magnets.

При создании источника с током протонов или легких однозарядных ионов до 100 мА в первую очередь можно рассматривать источники на микроволновом разряде. Они отличаются от источников на электрон-

циклотронном резонансе, используемых для получения многозарядных ионов, выбором частоты выше циклотронной и отсутствием гексапольных магнитов, задерживающих ионы в ЭЦР области для дальнейшего увеличения их зарядности. В настоящей работе сделана попытка объединить достоинства обоих типов источников ионов, разработав универсальную установку, в которой имеется возможность работы в обоих режимах. С помощью численного моделирования выполнен расчет параметров магнитной системы плазменного источника ионов с рабочей частотой 2,45 ГГц для получения протонов и ионов двухзарядного гелия. В качестве основного источника магнитного поля использована система постоянных магнитов, создающая типичное для ЭЦР источника ионов распределение поля в плазменной камере [1]. Модели элементов системы построены с использованием NdFeB марки N45H в качестве материала магнитов. Длина гексапольного магнита была выбрана равной длине плазменной камеры – 100 мм, диаметр плазменной камеры – 50 мм.

Для настройки оптимальной конфигурации магнитного поля предложено использовать перемещение кольцевых магнитов области инжекции и экстракции вдоль оси z , что обеспечивает возможность глубокой регулировки магнитного поля B_{inj} и B_{ext} в областях инжекции и экстракции, соответственно. Для увеличения возможностей подстройки параметров магнитного поля источника рассмотрена возможность перемещения брусков секступольного магнита в радиальном направлении для настройки B_{rad} . Для регулировки минимума аксиальной составляющей индукции поля B_{min} при неизменном положении всех кольцевых магнитов, а также для осуществления перестройки конфигурации магнитного поля таким образом, чтобы ЭЦР источник работал в режиме СВЧ источника ионов в систему добавлены несколько соленоидов, обеспечивающих регулировку значений B_{inj} и B_{ext} в необходимых пределах.

Изменение тока в соленоидах является дополнительной возможностью для достаточно точной настройки магнитного поля источника в любом режиме работы. Соленоиды при работе источника в ЭЦР режиме, их положение не препятствует перемещению крайних кольцевых магнитов.

Список литературы

1. <http://arxiv.org/pdf/1411.0546.pdf> for L. Celona, "Microwave Coupling to ECR and Alternative Heating Methods."

А.В. ПРОКОПЕНКО, К.Д. СМИРНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

СИСТЕМЫ СВЧ ПИТАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

Рассмотрены существующие СВЧ системы питания различных источников ионов на основе электрон-циклотронного резонанса (ЭЦР) с целью определения оптимальных параметров устройств. Разработаны возможные варианты исполнения системы СВЧ питания ЭЦР источников ионов. Выполнены расчеты отдельных элементов разработанной системы СВЧ-питания.

A.V. PROKOPENKO, K.D. SMIRNOV

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

MICROWAVE POWER SUPPLY SYSTEMS FOR ELECTRON-CYCLOTRON RESONANCE ION SOURCES

The existing microwave power supply systems for various ion sources based on electron-cyclotron resonance (ECR) are considered in order to determine the optimal parameters of devices. Possible versions of the microwave power supply system for ECR ion sources have been developed. The calculations of individual elements of the developed microwave power supply system are performed.

В настоящее время для генерации легких и тяжелых ионов широкое применение получили источники ионов на основе плазмы, полученной в результате электрон-циклотронного резонанса (ЭЦР). Такие источники ионов обладают простотой конструкции, высокой надежностью и возможностью получения многозарядных легких ионов. Для получения многозарядных ионов и увеличения их тока требуется увеличить частоту СВЧ колебаний возбуждающих плазму. В существующих источниках ионов традиционно используются частоты 2,45 ГГц, 9 – 10 ГГц и 14,5 ГГц и СВЧ системы питания этих источников имеют существенные отличия, как по элементной базе, так и по схематическим решениям. Меньшее распространение получили ЭЦР источники ионов, работающие на частотах 18 ГГц и 28 ГГц. В связи с этим, актуальной задачей будет являться анализ существующих СВЧ систем питания и разработка оптимизированных систем питания ЭЦР источника ионов.

В работе проведено рассмотрение существующих СВЧ систем питания ЭЦР источников ионов на основе семейства источников КИЕ [1,2] работающие на частотах 9,75 – 10,25 Гц. В качестве источника СВЧ энергии используются усилители на лампах бегущей волны ЛБВ с выходной средней мощностью от 250 Вт до 750 Вт. Система питания источников работающих на среднюю частоту 14,5 ГГц также основывается на лампе бегущей волны большой средней мощности [3]. Структурные схемы этих источников идентичны. Для получения легких ионов возможно применять ЭЦР источники ионов работающие на частоте 2,45 ГГц с использованием широко распространенных магнетронных генераторов мощностью до 1 кВт [4].

Разработана общая схема системы СВЧ питания ЭЦР источника ионов на частотный диапазон 8 - 12 ГГц и максимальную выходную среднюю мощность 600 Вт, выполненная с использованием полностью отечественной элементной базы. Источник СВЧ энергии будет состоять из отечественной лампы бегущей волны производства АО «НПП «Алмаз», полупроводникового предусилителя, который линейризует по мощности характеристики ЛБВ, и задающего перестраиваемого генератора. Выполнен расчет узла ввода мощности в цилиндрическую рабочую камеру диаметром 50 мм и подобраны элементы волноводного тракта, обеспечивающие надежность системы СВЧ питания.

Также разработана упрощенная схема питания источника легких ионов на основе ЭЦР на частоте 2,45 ГГц. Для генерации СВЧ энергии в диапазоне мощностей от 200 Вт до 1 кВт предложено использовать широко распространенные магнетронные генераторы, используемые в микроволновых печах. Регулировку мощности предполагается выполнять модернизированным источником анодного напряжения путем изменением анодного тока. Разработана система контроля за параметрами системы СВЧ питания ЭЦР источника ионов, а также проведены расчеты волноводного перехода с прямоугольного волновода сечением WR-340 на H образный волновод с внешними размерами 40 мм × 20 мм и высоковольтной развязки на напряжение 80 кВ для эффективной передачи СВЧ энергии.

Таким образом, созданы проекты эффективных систем питания источников легких ионов на основе ЭЦР на частотах 10 ГГц и 2,45 ГГц.

Список литературы

1. Drentje A.G., Kitagawa A., and M. Muramatsu//IEEE Transaction on plasma science, Vol. 36, №. 4, P.1502-1511.
2. Muramatsu M., Hojo S., Iwata Y. and others //Rev. Sci. Instrum. 87, 02C110 (2016).
3. Biri S., Valek A., Kenéz L., and others // Review of Scientific Instruments 73 (2002) 881.
4. Xu Y, Peng S, Ren H, and others//Rev SciInstrum. 2014 Feb;85(2):02A943.

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

СИСТЕМА ЭКСТРАКЦИИ И ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ДЛЯ ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Проведено моделирование системы экстракции и формирования пучка для ЭЦР источника ионов с рабочей частотой 2,45 ГГц для получения протонов и ионов двухзарядного гелия. Для фокусировки предложено использовать электростатическую линзу. Выполнено моделирование динамики пучков протонов и ионов He^{2+} в экстракторе.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

BEAM EXTRACTION AND FORMATION SYSTEM FOR ECR ION SOURCE

The simulation of the beam extraction and formation system for ECR ion source with the operating frequency of 2.45 GHz for producing protons and double-charged helium ions has been carried out. It is proposed to use an electrostatic lens for the beam focusing. The simulation of the beam dynamics of protons and He^{2+} ions in extractor has been conducted.

В работе представлены результаты численного моделирования системы экстракции пучка для ЭЦР источника ионов с рабочей частотой 2,45 ГГц, предназначенного для получения протонов и ионов He^{2+} . Выполнено моделирование системы экстракции пучка на основе квазибирсовской системы электродов и электростатической линзы. Система извлечения и фокусировки ионов, показанная на рис. 1, построена по аналогии с системой, приведенной в [1], с учетом геометрии плазменной камеры и магнитной системы источника.

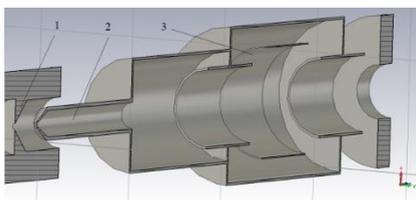


Рис.1 Схема экстрактора: 1 – плазменный электрод, 2 – извлекающий электрод, 3 – электростатическая линза.

Выполнялась оптимизация параметров плазменного электрода, наконечника извлекающего электрода экстрактора, геометрии электродов электростатической линзы и напряжений на электродах по минимуму эмиттанса.

С помощью численного моделирования показано, что при напряжениях на извлекающем электроде до минус 10 кВ относительно источника электростатическая линза может использоваться в качестве чоппера (рис. 2).

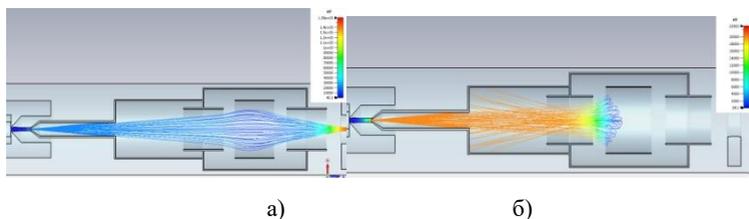


Рис. 2 Траектории пучка ионов He^{2+} в экстракторе: а – извлекающий электрод – минус 10 кВ, электростатическая линза – минус 2 кВ, б – извлекающий электрод – минус 10 кВ, электростатическая линза – 3 кВ.

На извлекающий и фокусирующий электроды экстракции может и быть подан ряд дискретных значений потенциала, что позволяет получать пучки как протонов, так и двухзарядных ионов гелия. Результаты оптимизации параметров экстрактора для выходной энергии 40 кэВ/нуклон приведены в табл. 1.

Табл. 1

Параметры пучка на выходе экстрактора

Параметр	Значение	
	p^+	He^{2+}
Типы укоряемых частиц	p^+	He^{2+}
Энергия ионов, кэВ	≤ 40	
Нормализованный эмиттанс, мм·мрад	0,74	1,38
Диаметр пучка, мм	8,0	8,0

Список литературы

1. A. Kitagawa et al. // Review of Scientific Instruments. 1998. Vol. 69. P. 674 – 676.

А.Е. ШИКАНОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ,
Е.Д.ВОВЧЕНКО, А.П. МЕЛЕХОВ, О.В. ДЕРЯБОЧКИН
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва,
РФ*

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

Исследовано формирование потоков ионов лазерной плазмы аксиально-симметричными магнитными полями, в частности постоянным магнитным полем с индукцией до 20 мТл и быстро нарастающим магнитным полем (БМП) со скоростью нарастания индукции до 10^7 Тл/с. В результате воздействия таких полей на расстоянии ~ 2 м получены потоки ионов бериллия длительностью ≥ 5 мкс с общим количеством ионов всех зарядностей $\sim 10^{12}$ за импульс, что на 2 порядка выше, чем при простом разлете лазерной плазмы.

A.E. SHIKANOV, S.M. POLOZOV, K.I. KOZLOWSKIИ,
E.D. VOVCHEKHO, A.P. MELEKHOV, O.V. DERYABOCHKIN
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

FORMATION OF LASER PLASMA ION FLUXES BY AXIALLY SYMMETRIC MAGNETIC FIELDS

The formation of laser plasma ion fluxes by axially symmetric magnetic fields is studied. By applying constant magnetic field (20 mT) and rapidly growing magnetic field (10^7 T/s) at plasma drifting section ~ 2 m, a pulse length of beryllium ion beam exceeded 5 μ s. The particle number of beryllium ions of all charges was about 10^{12} per pulse, which is two orders of magnitude higher than with a free expansion of the laser plasma.

В работе [1] для инжекции частиц в ускоритель RFQ исследовались потоки ионов углерода из лазерной плазмы, формируемые в магнитном поле соленоида при протекании постоянного тока через его обмотку. Получены потоки ионов углерода C^{+4} , C^{+5} и C^{+6} с количеством частиц, соответственно, 1.2×10^{11} , 1.0×10^{10} и 1.2×10^9 и длительностью импульса 3.4 мкс для 20% от амплитуды.

В данной работе продолжено изучение влияния различных аксиально-симметричных магнитных полей на формирование потоков ионов лазерной плазмы. Исследования проводились с использованием импульсного лазера YAG: Nd^{3+} ($E_{\text{макс}} \leq 850$ мДж, $\tau \approx 10$ нс) при двух значениях энергии лазерного излучения $E_1 = 125$ мДж и $E_2 = 515$ мДж, что соответствовало плотности мощности в пятне фокусировки

$q_1 \approx 1.3 \times 10^{11} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ и $q_2 \approx 5 \times 10^{11} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ (фокусное расстояние линзы $f = 75$ мм). Лазерный пучок направлялся на мишень под углом 30° по отношению к ее нормали. Мишень помещалась в вакуумную камеру с рабочим давлением $\approx 10^{-6}$ Торр.

Длина пролетного канала, равная 1650 мм, обеспечивала растяжение длительности импульса ионного потока. Для уменьшения потерь при распространении ионного пучка применялось постоянное магнитное поле, которое создавалось с помощью соленоида. Постоянный ток в его обмотке варьировался в интервале $0 \div 20$ А, что приводило к соответствующему изменению магнитного поля $B = 0 \div 14.6$ мТл. При этом с ростом поля наблюдалось увеличение длительности ионного пучка от 2.0 до 4.8 мкс, а количество ионов на коллекторе, установленном в конце пролетного канала, увеличилось от 3.4×10^{11} до 2.3×10^{12} .

Кроме постоянного магнитного поля (ПМП) исследовалось влияние на транспорт пучка быстронарастающего магнитного поля (БМП) конусной катушки [2]. При совместном применении ПМП и БМП число ионов на коллекторе достигло величины 1.4×10^{13} . Кроме того, применение БМП позволило увеличить общую длительность импульса. Обобщенные результаты коллекторных измерений представлены на рис. 1 и соответствуют проведенным теоретическим расчетам.

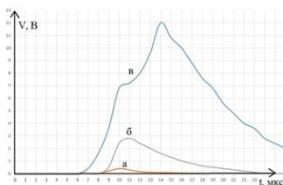


Рис.1. Сигналы с коллектора ионов
 а) без магнитного поля;
 б) с ПМП соленоида;
 в) с ПМП соленоида и БМП катушки

Результаты проведенных экспериментов позволяют рассчитывать на эффективное применение данного метода формирования ионных потоков лазерной плазмы в задачах инжекции частиц линейных резонансных ускорителей ионов.

Список литературы

1. Laser ion source with solenoid field / Takeshi Kanesue [et al.] // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 105(19).
2. A. Isaev, K. Kozlovskiy, A. Shikanov and E. Vovchenko. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 941 (2017) 012016, doi:10.1088/1742-6596/941/1/012016

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ВОЛНОВОДНЫЙ РАЗРЫВ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ ДЛЯ ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц

На основе прямоугольного волновода WR-340 разработан волноводный разрыв по постоянному току для системы СВЧ питания ЭЦР источника ионов, рассчитанный на постоянное напряжение 80 кВ. Результаты численного моделирования показывают низкие потери мощности в окружающее пространство и высокое значение коэффициента передачи.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, S.A. TUMANOV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

DC BREAK DESIGN FOR 2,45 GHZ ECRIS

A DC break at 80 kV for the ECRIS microwave power system is suggested to be based on a rectangular waveguide WR-340. The results of numerical simulation are found to reveal the low power loss in the surrounding space as well as the high gain.

Для получения ионных пучков часто используются ЭЦР источники, работающие на частоте 2,45 ГГц. ЭЦР источник обычно расположен на платформе, находящейся под высоким электрическим потенциалом, что сильно осложняет его эксплуатацию, обслуживание и контроль параметров. Решением этих проблем будет размещение СВЧ генератора и основных узлов системы СВЧ питания вне высоковольтной платформы системы. При этом для передачи СВЧ мощности в плазменную камеру источника используется волноводный разрыв по постоянному току (DC break), играющий роль изолятора между высоковольтной платформой, на которой располагается источник ионов и генератором СВЧ мощности, который выгодно расположить на земле. Расположение источника СВЧ мощности и других управляемых устройств под потенциалом земли позволяет облегчить настройку и управление СВЧ трактом. В такой конфигурации упрощается получение телеметрии с датчиков и управление параметрами системы СВЧ питания источника.

При разработке DC break должны быть решены следующие основные задачи. DC break должен обеспечивать надежную изоляцию от высокого напряжения, приложенного к высоковольтной платформе на которой расположен ЭЦР источник, иметь минимальное отражение передаваемой СВЧ мощности и иметь минимально возможный выход

СВЧ излучения в окружающие пространство, что обеспечивает возможность безопасной работы с оборудованием при его настройке и обслуживании [1].

Напряжение, под которым находится высоковольтная платформа источника, требует отказаться от использования воздушного зазора в качестве изолятора и полностью перекрыть сечение волновода диэлектриком с высокой электрической прочностью. Диэлектрическая пластина, расположенная в сечении волновода, вызывает скачкообразное изменение волнового сопротивления в СВЧ тракте, что в свою очередь приводит к отражению СВЧ мощности. Эти обстоятельства налагают противоречащие друг другу требования к диэлектрику, выступающему изолятором в DC break.

Разработанная численная модель DC break представляет собой модификацию дроссельного соединения волноводов. Два отрезка волновода сечением 86x43 мм с круглыми фланцами диаметром 200 мм имеют разрыв специальной формы, заполненный изолятором. Рассмотрены несколько вариантов изоляторов, выполненных из оксида алюминия и фторопласта. Один из вариантов конструкции DC break, удовлетворяющий обоим указанным требованиям, показан на рис. 1, зависимость коэффициента передачи от частоты – на рис. 2.

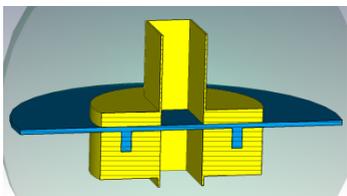


Рис. 1 Расчетная модель DC break

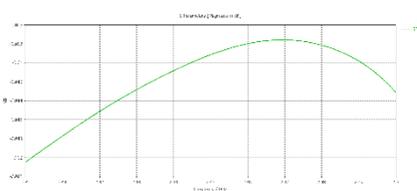


Рис. 2 Зависимость коэффициента передачи от частоты

Для всех рассмотренных вариантов DC Break, согласно результатам расчета, гарантированное расстояние, на котором плотность СВЧ-излучения не превышает 10 мкВт/см^2 , соответствующее действующим санитарным нормам ПДУ электромагнитных полей на рабочих местах пользователей ПК согласно СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», составляет 1 м.

Список литературы

1. https://www.lns.infn.it/~agnello/scambio/rep20132014/E_Ion%20sources%20&%20accelerators/E74_LEONARDI_waveguide%20DC-BREAK_2.45GHz.pdf.

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

*НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, Россия, НИЦ
«Курчатовский институт», Москва, Россия*

СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

В данной статье описывается создание прототипа распределенной управляющей системы (PCY) для ускорителей на основе микросервисной архитектуры. В данной PCY используется база данных временных рядов в качестве основного хранилища, что обеспечивает высокую производительность системы при сохранении экспериментальных данных. Для проверки выбранных решений, созданный прототип развернут на тяжелоионном ускорителе (ТИПр-1) для контроля, в частности, за вакуумной системой установки. В статье приведены результаты анализа метрик на примере параметров вакуумной системы, варианты персонализированных пользовательских интерфейсов, а также циклограммы работы элементов PCY. Помимо этого, в статье рассмотрен вариант совместимости с такими системами диспетчерского контроля (SCADA системами) как TANGO Controls. Также рассмотрены такие технические параметры как быстродействие и работа в условиях высокой нагрузки на хранилище развернутой PCY. С учетом рассмотренных характеристик делается вывод о перспективах использования данной системы и подхода к построению систем контроля для ускорителей, в частности для разрабатываемого источника синхротронного излучения на основе кольцевого синхротрона на 6 ГэВ в рамках программы «развития синхротронно-нейтронных исследований».

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

*NRC «Kurchatov Institute» - ITEP, Moscow, Russia, NRC «Kurchatov Institute»,
Moscow, Russia*

DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM PROTOTYPE DEVELOPMENT FOR PARTICLE ACCELERATORS BASED ON MICROSERVICE ARCHITECTURE.

This article describes how to prototype a distributed control system (DCS) for accelerators based on a microservice architecture. This DCF uses a time series database as the main storage, which ensures high system performance while maintaining experimental data. To test the selected solutions, the created prototype was deployed on a heavy ion accelerator (TIPr-1) to control, in particular, the vacuum system of the installation. The article presents the results of the analysis of metrics on

the example of the parameters of the vacuum system, options for personalized user interfaces, as well as the cyclograms of the operation of DCS elements. In addition, the article discusses the option of compatibility with such dispatch control systems (SCADA systems) as TANGO Controls. Also considered are such technical parameters as speed and operation under high load on the storage of the deployed DCS. Taking into account the characteristics considered, a conclusion is made about the prospects of using this system and an approach to constructing control systems for accelerators, in particular, for the developed synchrotron radiation source based on a 6 GeV ring synchrotron within the framework of the program "for the development of synchrotron-neutron research"

Основной целью распределенной системы управления является предоставление информации оператору установки (узла установки) набора информации в понятном и наглядном виде и объеме, достаточном для понимания состояния экспериментальной установки и проводимых на ней работах. Операторский контроль реализует т.н. медленное управление - сценарное управление режимами установки при проведении плановых и экспериментальных работ. При производстве операций операторского контроля, узлы установки сообщают о результатах изменения своего состояния по обратной связи, что позволяет определять состояние физической установки в режиме реального времени. Любая экспериментальная установка, особенно, масштабов разрабатываемой ИССИ-4 является комплексом различных узлов для проведения независимых работ разными командами ученых. При этом каждый узел по отдельности и физическая установка в совокупности - набор независимых систем, таких как вакуумная система, система управления поворотными магнитами, система контроля нахождения персонала на территории и т.д. В связи с этим разрабатываемая система управления строится в рамках архитектуры микросервисов - совокупности независимых программных служб (сервисов), отвечающих по отдельности за свою специфическую задачу (например - контроль вакуумной системы). Результаты применения микросервисной архитектуры на примере прототипа системы управления тяжелоионным ускорителем (ТИПp-1) продемонстрировало обеспечение масштабируемости и отказоустойчивости системы за счет независимого развертывания служб контроля за различными узлами.

Список литературы

1. <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>

В.С. ДЮБКОВ^{1,2}, А.С. ПАНИШЕВ¹, С.М. ПОЛОЗОВ^{1,2},
В.Л. ШАТОХИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИИ

Рассматриваются основные подходы к моделированию, оценке потока и мощности этого излучения, падающего на поверхность вакуумной камеры источника синхротронного излучения. Исследование проводится методом Монте-Карло с помощью программы Synrad+. Приводятся особенности расчета газовых нагрузок, вызванных облучением стенок вакуумных камер. Даны примеры расчета мощности СИ, поглощенной элементами накопительного кольца источника синхротронного излучения.

V.S. DYUBKOV^{1,2}, A.S. PANISHEV¹, S.M. POLOZOV^{1,2},
V.L. SHATOKHIN^{1,2}

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

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

CALCULATION OF SYNCHROTRON RADIATION AND PHOTOSTIMULATED DESORPTION

The main approaches to the Monte Carlo simulation for synchrotron radiation and the evaluation of its flux and power acting on the surface of the vacuum chamber of the synchrotron light source are considered. Simulations were done by the Synrad+ program. The calculation properties of gas loads caused by irradiation of the walls of vacuum chambers are presented. Results of the SR power simulation absorbed by the storage ring elements are given.

Для изучения взаимосвязи возникающих изменений в параметрах синхротронного излучения (СИ) с требованиями к параметрам поглотителей СИ рассмотрены подходы к определению характеристик потока излучения в накопительном кольце источника СИ. С этой целью изучены возможности программного модуля SynRad+ и его совместного использования с пакетом Molflow+ для численного моделирования вакуумных систем ускорительных комплексов [1]. Synrad+[2] - программа для определения параметров СИ (поток излучения, мощность, спектр), падающего на стенки камер методом Монте-Карло. Она вычисляет траектории фотонов для расчета потока и распределение мощности синхротронного излучения, падающего на

поверхность. Использование данной программы в одном пакете с Molflow+, позволяет перевести полученное распределение СИ в газовый поток десорбции с внутренней поверхности. Таким образом, можно отследить влияние изменений параметров геометрии и оптической системы на уровень вакуума в проектируемой установке.

Для участка одного периода накопительного кольца источника СИ ESRF-EBS [3] было смоделировано синхротронное излучение пучка электронов и выполнен расчет фотостимулированной десорбции. Исследовалось влияния мощности СИ полученного на этом участке, на газовыделение поглотителей этого участка. Используя OpticsBuilder [4], в расчетной модели была задана конфигурация магнитной структуры в виде последовательности магнитных элементов и участков дрейфа. Синхротронное излучение генерировалось пучком электронов с энергией 6 ГэВ и током 200 мА. Для всех поглотителей СИ, расположенных на выбранном участке, было получено распределение поглощенного потока СИ. Плотность поглощаемой мощности составила до 160 Вт/см², а на отдельные абсорберы приходило до 278 Вт. Результаты расчета падающего СИ были экспортированы из Synrad+ в Molflow+, в результате этого были вычислены значения стимулированной десорбции с поверхности абсорберов для дозы 100 А·ч. Уровень газовыделения этих поверхностей составил $8 \cdot 10^{-8}$ – $6 \cdot 10^{-7}$ мбар·л/с/см², тогда как уровень потоков десорбции для остальных участков камер был равен 10^{-11} мбар·л/с/см². Полученные значения были проанализированы, путем сравнения с экспериментальными данными.

В результате выполненного исследования была получена методика расчета параметров СИ и фотостимулированной десорбции используя метод Монте-Карло. Сравнение с экспериментальными данными показало возможность ее применения для учета влияния СИ на режимы работы физических установок, что будет использовано в дальнейших работах по проекту создания источника СИ в НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Recent developments of Monte-Carlo codes MolFlow+ and SynRad+. M. Ady, R. Kersevan. 10th Int. Particle Accelerator Conf., Melbourne, Australia - doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP037.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2019/papers/tupmp037.pdf>
2. Synrad+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/<https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>.
3. ESRF Upgrade Programme Phase II (2015-2022) - “EBS Storage Ring Technical Report”. - 2018.
4. OpticsBuilder documentation. <https://molflow.web.cern.ch/content/opticsbuilder-documentation>.

С.В. КУЦАЕВ, Р. АГУСТССОН, Р. БЕРРИ, С. БУШЕ,
А.Ю. СМИРНОВ

RadiaBeam Technologies, LLC, Santa Monica, CA 90404, USA

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЗАМЕНЫ РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Радиоизотопы вплоть до настоящего времени являются одним из наиболее используемых источников гамма-излучения. Популярность таких источников объясняется компактностью, дешевизной и чистотой энергетического спектра излучения. Тем не менее, современная тенденция, заданная МАГАТЭ, направлена на замену таких источников альтернативными технологиями, в связи с риском аварий, утечек или их нелегального использования. В качестве замены радиоактивных источников можно использовать тормозное излучение, получаемое с помощью ускорителей электронов. Однако для того, чтобы стать адекватной заменой радиоизотопам, ускорители должны иметь сравнимые с ними вес, размеры и стоимость. В данном докладе будут продемонстрированы ряд ускорителей, разрабатываемых в компании RadiaBeam Technologies для замены таких радиоизотопов как Co-57, Se-75, Cs-136, Ir-192 и Co-60.

S.V. KUTSAEV, R. AGUSTSSON, R. BERRY, S. BOUCHER,
A.YU. SMIRNOV

RadiaBeam Technologies, LLC, Santa Monica, CA 90404, USA

ELECTRON ACCELERATORS FOR RADIOACTIVE RADIATION SOURCES REPLACEMENT

Radioisotopes are still one of the most widely used sources of gamma radiation. The popularity of such sources is explained by the compactness, low cost and purity of the energy spectrum of the radiation. However, the current trend pursued by the IAEA is to replace such sources with alternative technologies, due to the risk of accidents, deferrals, or their illegal use. One way of such replacement is to use a Bremsstrahlung produced by electron accelerators. However, in order to become an adequate substitute for radioisotopes, accelerators must be of comparable weight, size and cost. In this talk we will present a number of accelerators being developed by RadiaBeam Technologies to replace radioisotopes such as Co-57, Se-75, Cs-136, Ir-192 and Co-60.

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*

О ПРИМЕНЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК ПРИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ

Проведено экспериментальное исследование стойкости поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и ферритно-мартенситной коррозионностойкой стали ЭК-181 (Русфер) к мощному импульсному воздействию. Облучение образцов проводилось пучками электронов с энергией ~ 100 Дж за импульс, длительность которого составляла 100 нс по полувысоте. В работе представлены результаты экспериментов при различном уровне нагружения образцов. Построены зависимости убыли массы от количества воздействий электронного пучка. Проведено микроскопическое исследование облученных образцов.

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*

ON THE APPLICATION OF HIGH-CURRENT ELECTRON BEAMS TO STUDY THE STABILITY OF CONSTRUCTION MATERIALS FOR THE FIRST WALL OF PLASMA INSTALLATIONS UNDER POWERFUL PULSE IMPACT

An experimental study of the resistance of polycrystalline tungsten (Goodfellow) and ferrite-martensitic corrosion-resistant steel EK-181 (Rusfer) to a powerful impulse effect has been carried out. The samples were irradiated by electron beams with an energy of ~ 100 J per pulse, the duration of which was 100 ns FWHM. The paper presents the results of experiments at different loading levels of the samples. The dependences of the mass loss on the number of impacts of the electron beam are plotted. A microscopic study of irradiated samples was carried out.

Одной из важных проблем при проведении плазменных экспериментов на мощных лабораторных установках является предотвращение попадания горячей плазмы и сильноточных пучков на первую стенку вакуумной камеры. В настоящее время проделана огромная работа по отработке систем обратной связи, позволяющих избежать такой ситуации [1, 2], однако полностью исключить её нельзя. В связи с этим крайне важным является понимание того, как поведут себя материалы стенок вакуумной камеры при выделении на их поверхности больших потоков энергии, вплоть до сотен Дж. На сегодня существует множество установок, позволяющих исследовать взаимодействие плазмы и пучков тяжелых заряженных частиц с различными материалами [3]. В то же время, экспериментов по взаимодействию электронных пучков с конструкционными материалами не слишком много, хотя вопрос может быть весьма актуальным. Особенно в свете того, что в ряде плазменных процессов могут возникать пучки «убегающих» электронов, переносящих значительный ток, а соответственно, угрожающих сохранности стенок вакуумной камеры.

Существенным преимуществом установки «Кальмар» является возможность изменения параметров электронного пучка в широком диапазоне ($W = 40 - 1500$ Дж/см² на поверхности мишени), широкий набор диагностик, позволяющий достаточно точно определять параметры взаимодействия пучка с образцом, а также регистрировать разлёт плазмы с поверхности облучаемого образца [4, 5].

Проведены серии экспериментов для образцов двух типов: поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и ферритно-мартенситной коррозионностойкой стали ЭК-181 (Русфер). Образцы облучались 1, 3, 6 и 10 раз при средней энергии в импульсе порядка 100 Дж. После облучения проводилось микроскопическое исследование, а также выполнен количественный энергодисперсионный рентгеновский микроанализ поверхности образцов. Наглядно продемонстрировано, что катоды должны быть выполнены из плохо расплываемых материалов. Показано, что при больших нагрузках вольфрам начинает активно растрескиваться, в то время, как на стали возникающие трещины в основном заплываются.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ № 1953 от 29.09.2020).

Список литературы

1. Саврухин П.В., Шестаков Е.А., Борщеговский А.А.// ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 4. С. 50–62.
2. Hollmann E.M., Aleynikov P.B., Fülöp T. et al. — Physics of Plasmas, 2015, vol. 22, p. 021802.

3. Будаев В.П.// ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 4
4. Demidov B.A., Efremov V.P., Kalinin Yu.G. et.al// Journal of Physics: Conference Series. 2016. 774(1),012129.
5. Bobyr N.P., Kazakov E.D., Kurilo A.A. et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1686 012066

С.П. ПОЛЯКОВА¹, Т.В. САВЕНКОВА¹, А.Р. КАРИМОВ¹
Ю.С. ПАВЛОВ²

¹ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», Москва

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Москва

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ, КАЧЕСТВА, ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ

Изучали влияние облучения электронным пучком на микробиоту пищевых ингредиентов, а также на их органолептические, физико-химические и технологические свойства. Представлены результаты экспериментов по облучению муки и орехов. Установлено, что зависимость количества микроорганизмов и показателей качества от дозы облучения пищевых ингредиентов имеет полимодальный характер.

S.P. POLYAKOVA¹, T.V. SAVENKOVA¹, A.R. KARIMOV¹
YU.S. PAVLOV²

¹*Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia*

²*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow,
Russia*

THE EFFECT OF ELECTRON BEAM IRRADIATION ON THE SAFETY, QUALITY, PHYSICAL, CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF FOOD INGREDIENTS

The effect of electron beam irradiation on the microbiota of food ingredients, as well as on their organoleptic, physico-chemical and technological properties, was studied. The results of experiments on the irradiation of flour and nuts are presented. It is established that the dependence of the number of microorganisms and quality indicators on the radiation dose of food ingredients has a polymodal character.

В настоящий момент в России растет интерес к применению радиационных способов обработки сырья и пищевых продуктов с целью снижения их микробиологической обсемененности. Однако летальные дозы для микроорганизмов, полученные различными учеными в результате исследований, имеют расхождения, что вероятно связано с особенностями обрабатываемых продуктов, их микробиоты и способами радиационной обработки. Кроме того, радиационная обработка пищевых ингредиентов не может не сказываться на их физико-химические свойства, что в последующем может повлиять на

технологический процесс в условиях производства и качественные характеристики готового продукта. Это обуславливает необходимость проведения комплексных исследований влияния обработки радиационным облучением на изменение микробиологических, органолептических, физико-химических и технологических свойств пищевых ингредиентов.

Целью данных исследований являлось изучение эффективности применения облучения электронным пучком образцов муки и орехов для подавления их микробиоты, изучение влияния различных режимов облучения на органолептические, физико-химические и технологические свойства пищевых ингредиентов.

Облучение образцов пищевых ингредиентов проводили на ускорителе УЭЛВ-10-10-С-70 в ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН, средняя энергия электронов пучка – 7-9 МэВ, дозами в интервале 0-10 кГр. Процессы облучения контролировались пленочными дозиметрами, расположенными внутри обрабатываемых образцов.

Изучали динамику количества различных групп микроорганизмов – КМАФАнМ, БГКП и плесневых грибов. Кроме того, изучали изменение органолептических показателей муки и орехов, показателей количества, качества и ИДК клейковины муки, реологические показатели теста из муки после различных доз облучения.

Установлено, что зависимость количества микроорганизмов от дозы облучения имеет немонотонный, полимодальный характер – при обработке тест культур ионизирующим облучением от 4 до 5 кГр наблюдается увеличение роста микроорганизмов для всех условий обработки, и только затем их ингибирование. Это можно объяснить эффектом радиационного горемезиса. Органолептические характеристики продуктов изменялись также неоднозначно – при облучении орехов дозой до 6 кГр наблюдалось улучшение вкуса и запаха ореха, а затем резкое их ухудшение, в муке изменения органолептических показателей не отмечалось. При этом физико-химические показатели муки и вязкоупругие свойства теста из нее изменялись значительно и неравномерно. Изменение водопоглощительной способности муки, вязкости, стабильности, времени образования теста и других технологических свойств муки в зависимости от доз облучения носят полимодальный характер, что вероятно связано с влиянием облучения на третичную и четвертичную структуры глиадинов и глютеинов муки.

А.А. ГОРЧАКОВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН,
С.Е. ТОПОРКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАЗРАБОТКА УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР Н – ТИПА

В работе представлены результаты разработки коротких ускоряющих резонаторов Н – типа, проведены расчёты основных электродинамических характеристик, определены основные конструктивные особенности.

A.A. GORCHAKOV, M.A. GUSAROVA, M.V. LALAYAN,
S.E. TOPORKOV

National Research Nuclear University MEPHI Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF H – TYPE ACCELERATION STRUCTURES

The paper presents the results of the development of H – type short accelerating resonators, calculates the main electrodynamic characteristics, and defines the main design features.

Резонаторы Н – типа показывают высокую эффективность работы на относительных скоростях частиц от 0.01 до 0.3 [1, 2]. Классические резонаторы Н – типа, используемые в ускорителях ионов являются длинными многозазорными структурами. Например используемые в UNILAC GSI или CPHS (Compact Pulse Hadron Source at Tsinghua University), XiPAF (Xi'an Proton Application Facility) [3, 4]. Современные подходы к созданию ускорителей используют модульный подход, предполагающий использование нескольких групп коротких ускоряющих структур. Проведены расчеты ЭДХ коротких структур Н - типа с пятью ускоряющими зазорами.

в статье представлены результаты проектирования двух ускоряющих резонаторов с рабочей частотой 81 МГц и относительной скоростью движения частиц 0,06 и 0,1. Общие принципы и большинство конструктивных решений совпадают.

В рамках работы было проведен расчет электромагнитных полей и основных электродинамических характеристик. Удалось добиться высокой эффективности разрабатываемого резонатора – погонное шунтовое сопротивление составляет более 200 МОм/м для структуры с $\beta = 0.06$ и более 100 Мом/м для структуры с $\beta = 0.01$.

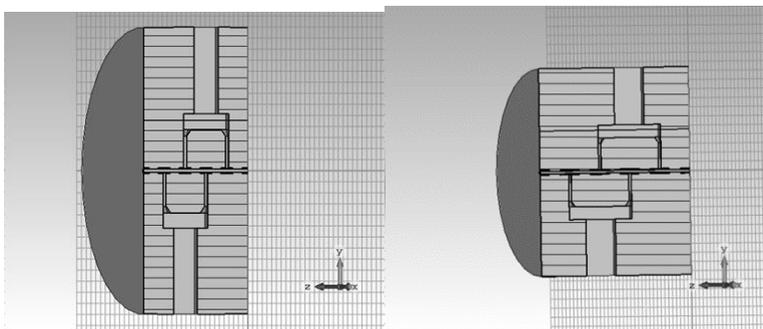


Рис. 1. Вакуумные модели ускоряющих резонаторов Н-типа на рабочую частоту 81,25 МГц и относительную скорость частиц 0,057 (слева) и 0,099 (справа).

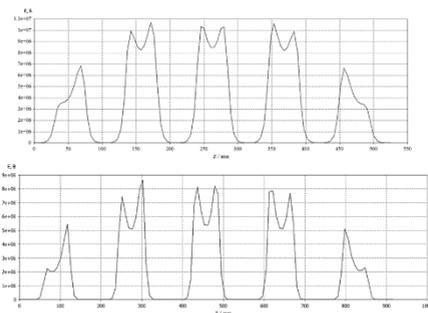


Рис. 2. Распределения электрического ускоряющего поля вдоль оси пролетного канала для резонаторов с относительной скоростью частиц 0,057 (слева) и 0,099 (справа).

Список литературы

В.В.Парамонов, А.П. Дуркин Сравнение характеристик ускоряющих структур на высокой рабочей частоте для ускорения протонов низкой энергии. // Proceedings of LaPlas 2019 P.122-123.

Buleiko, A.B., Lalayan, M.V., Toporkov, S.E., High frequency and multiphysical analysis of the multigap CH-resonators. // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016, 13(7), p. 867–869

R.Tang et. al. RF and primary beam dynamics design of a 325 MHz IH-DTL //Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark.

U. Ratzinger, et. al. Efficient heavy ion acceleration with IH-type cavities for high current machines in the energy range. // Proceedings of LINAC2016, East Lansing, MI, USA.

А.И. МАКАРОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, М.А. ГУЗОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ОЦЕНКА ДОПУСКОВ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ И УСТАНОВКУ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ПОКФ НА ЧАСТОТЕ 81,25 МГц.

В данной работе были определены коэффициенты чувствительности рабочей частоты к вариации ключевых размеров четырехкамерного резонатора с ПОКФ. А также исследованы зависимости изменения амплитуды напряженности электрического поля и частоты рабочего вида колебаний от изменения положений пилонов резонатора. По исследованным зависимостям была произведена оценка допусков.

A.I. MAKAROV, S.M. POLOZOV, YU.YU. LOZEEV, M.A.
GUZOV

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

MANUFACTURING AND MOUNTING ELECTRODES TOLERANCE ESTIMATION FOR A 81.25 MHZ RFQ ACCELERATING STRUCTURE

In the present paper, the operating frequency sensitivity coefficients dependences on the main SV-RFQ cavity parameters variation were obtained. Moreover, electric field strength and operating frequency dependences on the cavity vanes deflections was investigated. Finally, manufacturing and mounting tolerance estimation was performed.

В работе используется модель четырехкамерного резонатора с ПОКФ с окнами магнитной связи [1]. Основной вид колебания H_{210} настроен на рабочую частоту 81,25 МГц.

Резонансная частота рабочего вида колебаний и напряженность электрического поля очень чувствительны к изменениям некоторых размеров структуры. В особенности это касается размеров, расположенных вблизи оси резонатора, где сосредоточена электрическая компонента поля. Поэтому важно определить точность изготовления деталей резонатора. Допустимые отклонения частоты и амплитуды поля были получены из результатов расчета динамики частиц: допустимое отклонение по частоте - 50 кГц на каждый размер, по полю - 0,5% для всех размеров.

Были исследованы зависимости частоты рабочего вида колебания и изменения амплитуды напряженности электрического поля от ключевых размеров резонатора (рисунок 1). По этим зависимостям были определены коэффициенты чувствительности, некоторые из них приведены в таблице 1.

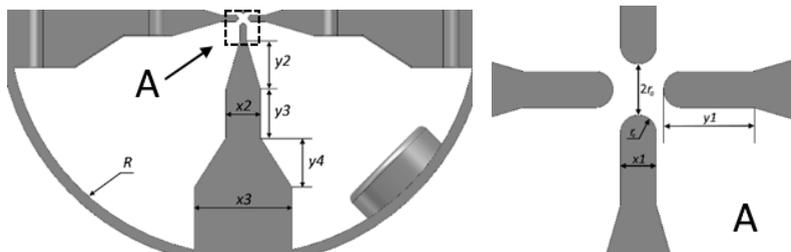


Рис. 1. Основные размеры резонатора

Ускоряющие электроды изготавливаются отдельно от обечайки резонатора и устанавливаются в нее. Точность их установки также оказывает сильное влияние на ЭДХ резонатора. Поэтому, были также исследованы зависимости частоты рабочего вида колебаний и изменения амплитуды напряженности электрического поля от изменения положений электродов.

Таблица 1 — Коэффициенты чувствительности резонансной частоты основного вида колебаний

Параметр	df/dr , кГц/мм
Апертура, r_0	3246,1
Толщина электрода, x_1	3041,3
Радиус обечайки, R	184,4
Длина выступа перед электродом, x_2	78,7
Длина скоса широкой части пилона, x_3	65,9
Высота электрода, y_1	37,7
Высота узкой части пилона, y_3	50,8

По исследованным зависимостям были получены допуски на ключевые размеры резонатора, а также допуски на точность установки электродов в обечайку резонатора.

Список литературы

1. Andreev V.A. Structure for accelerating heavy ions with uniformly spaced quadrupole focusing (USQF). Patent US5483130 (1996).

М.А. ГУЗОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, Ю.Ю. ЛОЗЕЕВ, А.И. МАКАРОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

СИСТЕМА ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ПОКФ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ЧАСТОТЕ 81,25 МГц

Рассчитаны элементы подстройки резонансной частоты рабочего вида колебаний в ускоряющей структуре с пространственно – однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) с окнами магнитной связи. Рассмотрены динамические и статические элементы подстройки: “плунжеры”, погружаемые в объем резонатора и “кубики”, устанавливаемые в окна магнитной связи. Выбраны количество, расположение и размеры элементов, а также диапазон рабочего хода для динамической подстройки.

**M.A. GUZOV, S.M. POLOZOV, YU.YU. LOZEEV, A.I.
MAKAROV**

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

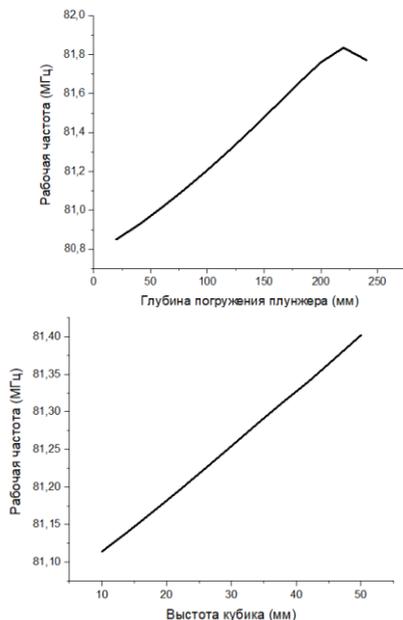
FREQUENCY TUNNING ELEMENTS IN THE RFQ ACCELERATING STRUCTURE WITH OPERATING FREQUENCY 81.25 MHZ

The operating frequency tuning elements for the radio frequency quadrupole (RFQ) accelerator structure with magnetic coupling windows are designed. The dynamic and static tuning elements were considered - “plunges” diving into the cavity volume and “cubes” placed inside magnetic coupling windows correspondingly. The quantity, placement and dimensions of the tuning elements were chosen, the operating range for dynamic elements was also obtained.

Подстроечная система резонансной частоты основного вида колебаний в ускоряющей структуре состоит из статических и динамических элементов. Статические элементы осуществляют первоначальную подстройку частоты, а динамические - плавную регулировку частоты в процессе эксплуатации структуры. В качестве ускоряющей структуры используется четырехкамерный резонатор с ПОКФ с окнами магнитной связи [1].

В качестве статических элементов используются “кубики”, устанавливаемые в окна магнитной связи.

Динамические элементы – “плунжеры”. Они устанавливаются парами в каждую из семи ячеек резонатора, кроме центральной.



а)

б)

Рис. 1. Результаты моделирования элементов подстройки; а – график зависимости резонансной частоты рабочего вида колебаний от высоты кубиков б – график зависимости резонансной частоты рабочего вида колебаний от глубины погружения плунжера в объем резонатора

Были исследованы зависимости резонансной частоты рабочего вида колебаний (рис. 1а) и амплитуды напряженности электрического поля от глубины погружения плунжеров в объем резонатора для различных диаметров плунжера. Оптимальный диаметр плунжера составил $d = 145$ мм, а также был выбран подходящий патрубкок ДУ160.

Были исследованы зависимости резонансной частоты рабочего вида колебаний (рис.1б) и амплитуды напряженности электрического поля от высоты кубиков с фиксированными шириной (136 мм) и длиной (380 мм).

По результатам исследований была выбрана система подстройки частоты, имеющая статические элементы для начальной настройки, а также динамические элементы, обеспечивающие плавную регулировку частоты на $df_{pl} = 750$ кГц.

Список литературы

1. Andreev V.A. Structure for accelerating heavy ions with uniformly spaced quadrupole focusing (USQF)// Patent US5483130 (1996).

А.А. ГОРЧАКОВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН,
С.Е. ТОПОРКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

КОМПЕНСАЦИЯ ДИПОЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ В СТРУКТУРАХ Н – ТИПА

В ходе работы были определены паразитные явления на ускоряемый пучок возникающие в структурах Н – типа. Рассмотрены различные способы борьбы с дефокусирующей и отклоняющей составляющей электрического поля, и введены конструктивные доработки, позволяющие минимизировать данное влияние.

A.A. GORCHAKOV M.A. GUSAROVA, M.V. LALAYAN,
S.E. TOPORKOV

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

COMPENSATION OF THE DIPOLE COMPONENT OF THE ACCELERATING FIELD IN H-TYPE STRUCTURES

In the course of the work, parasitic phenomena on the accelerated beam occurring in H – type structures were determined. Various methods of dealing with the defocusing and deflecting components of the electric field are considered, and design improvements are introduced to minimize this effect.

При проектировании коротких пятизонарных ускоряющих резонаторов Н – типа на рабочую частоту 81 МГц и относительную скорость частиц 0,06 и 0,1 было обнаружено несколько недостатков данного типа резонаторов: возникновение дипольной составляющей и неравномерность ускоряющего поля. Одним из способов решения является увеличение толщины стенок трубок дрейфа, но при этом ухудшается эффективность структуры, кроме того дипольная составляющая уменьшается не столь существенно. В связи с этим было принято решение по использованию компенсирующих колец [1, 2], позволяющих получить ровное плато пика ускоряющего поля, значительно уменьшить дипольную составляющую, кроме этого эффективность структуры остается на должном уровне – погонное шунтовое сопротивление составляет более 200МОм/м и 100МОм/м для структуры с относительной скоростью движения частиц 0,057 и 0,099 соответственно.

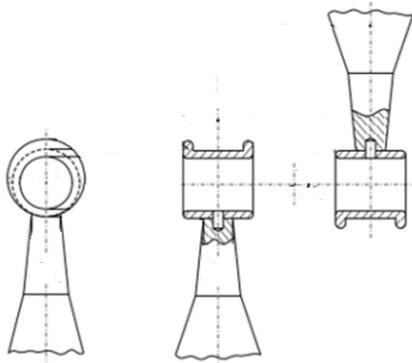


Рис.1. Форма компенсационных колец дрейфовых трубок

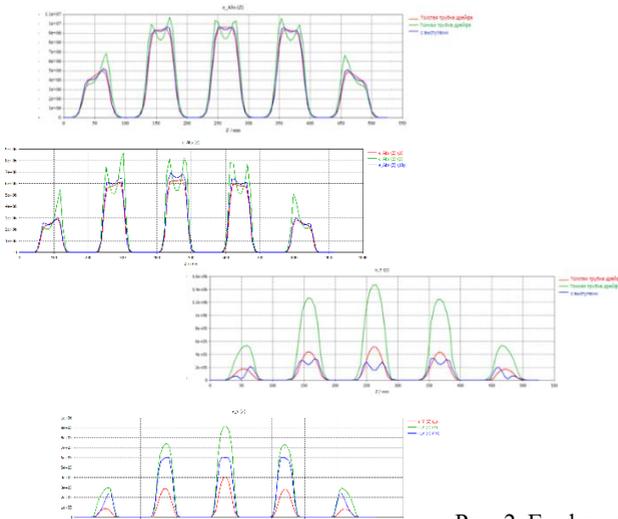


Рис. 2. График распределения электрического поля вдоль пролетного канала и график зависимости дипольной составляющей с тонкими, толстыми трубками дрейфа и компенсационными кольцами, для структуры с относительной скоростью частиц 0,057 (слева) и 0,099 (справа).

Список литературы

1. Buleiko, A.B., Lalayan, M.V., Toporkov, S.E., High frequency and multiphysical analysis of the multigap CH-resonators, // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016, 13(7), p. 867–869
2. U. Ratzinger H-TYPE LINAC STRUCTURES GSI Darmstadt, Darmstadt, Germany.

М.М. БУЛГАЧЕВА, М.А. ГУСАРОВА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ УРОВНЕЙ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В ОДНОАЗОРНЫХ ГРУППИРОВАТЕЛЯХ НА ЧАСТОТУ 81,25 МГц

Приведены результаты расчета пороговых уровней напряжения, при котором возможно развитие мультипакторного разряда в одноазорных группирователях на частоту 81,25 МГц. С использованием программы MultP-M проведено моделирование траекторий движения электронов в группирователях. Проведена оценка опасности мультипакторного разряда с учетом рабочего диапазона напряженности электрического поля.

M.M. BULGACHEVA, M.A. GUSAROVA

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

MULTIPACTOR DISCHARGE IN THE SINGLE GAP BUNCHERS AT 81,25 MHZ

The results of calculating the threshold voltage levels causing multipactor discharge in single-gap buncher cavities at 81.25 MHz are presented. Multipactor electrons trajectories were modeled using MultP-M program. The risk of multipactor discharge is estimated considering the operating range of the electric field strength.

В основе мультипакторного разряда лежит явление вторичной электронной эмиссии. Возникновение мультипакторного разряда в СВЧ устройствах ускорителей заряженных частиц нарушает их нормальную работу, приводит к потерям СВЧ мощности, увеличению времени тренировки, нагреву структуры, а в некоторых случаях даже к пробоям [1].

В работе исследованы одноазорные группирователи на частоту 81,25 МГц (рис. 1). Проведен аналитический расчет пороговых уровней напряженности электрического поля, при которых возможно развитие мультипакторного разряда в зазоре: $V = Ed = d^2(2\pi f)^2 m / ((2n-1)\pi e)$ [2]. По формуле получены следующие значения: для $n=1$ 136,5 В, для $n=2$ 45,5 В, для $n=3$ 17,1 В и для $n=4$ 9,1 В, где n – порядок мультипакторного разряда.

Для заданной конструкции также рассчитаны распределение электромагнитных полей, распределение ускоряющей составляющей поля $E_z(z)$ и электродинамические характеристики. Рассчитанные электрические и магнитные поля были загружены в программу MultP-

М [3, 4], и далее производилось моделирование и подробный анализ траекторий движения вторичных электронов.

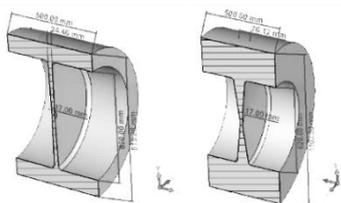


Рис. 1. Геометрия банчеров

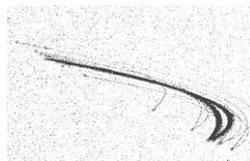


Рис. 2. Пример траектории движения электрона (уровень поля 6,939 отн.ед., 200 ВЧ периодов, 100 соударений, размах 0,4 мм, энергия 400 эВ)

При анализе были определены параметры каждого вторичного электрона: уровень нормированного поля в относительных единицах, расположение и вид траектории, число ВЧ соударений, размах траектории, энергия и фаза вылета, зависимость энергии от фазы.

Детальное исследование траекторий движения электронов показало, что стабильные траектории в области внешней поверхности группирователей обнаруживаются начиная с уровня нормированного поля 0,457 отн.ед. для конструкции с узким зазором и с уровня 0,847 отн.ед. для конструкции с широким зазором. Эти относительные величины соответствуют величине напряженности поля в зазоре 3,4 МВ/м и 9,7 МВ/м соответственно.

При рабочем уровне поля в зазоре 0,5 МВ/м, можно сделать вывод, что мультипакторный разряд в области внешней поверхности для данных конструкций с учетом величины рабочего поля не представляет опасности.

Список литературы

1. Гусарова М.А., Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П., Мультипакторный разряд в сверхвысокочастотных узлах и элементах ускорителей заряженных частиц, М.: НИЯУ МИФИ, 2011, с. 7
2. Hasan Padamsee, Jens Knobloch, Tom Hays, RF superconductivity for accelerators, John Wiley & Sons, Inc., 1998, p. 191
3. M.A. Gusarova et al., NEW POSSIBILITIES OF MULTIP-M CODE, Proc. of IPAC2014, p.433-435
4. M Gusarova et al., Design of the two-gap superconducting re-buncher, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1067 (2018) 082005

Р.А. ЗБРУЕВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПЕРИОДИЧЕСКИХ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР ДИАПАЗОНОВ S, C И X.

Изучена область применения ускорителей, включающих в себя структуры S, C и X-диапазонов. Произведено моделирование структур, предназначенных для возможного перехода на повышенную частоту, для линейного ускорителя инжекционного комплекса источника синхротронного излучения ИССИ-4. Определены электродинамические характеристики и предложены пути дальнейшей модификации.

R.A. ZBRUEV, M.A. GUSAROVA, M.V. LALAYAN
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

COMPARISON OF ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS THE S, C, AND X-BANDS BIPERIODIC ACCELERATING STRUCTURES.

The application's range of accelerators with the S, C and X-bands structures is studied. The structures intended for a possible transition to an increased frequency for the linear accelerator of the injection complex of the SSRS-4 synchrotron radiation source are modeled. The electrodynamic characteristics are determined and the ways of further modification are proposed.

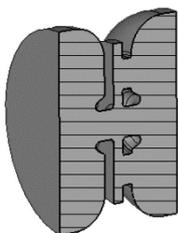


Рис. 1. Бипериодическая ускоряющая структура с внутренними ячейками связи

Проект линейного ускорителя инжекционного комплекса источника синхротронного излучения ИССИ-4 предполагает использование бипериодических структур S-диапазона [1,2]. Наряду с этим рассматривается возможность перехода к структурам диапазонов C и X. В работе исследовалась бипериодическая ускоряющая структура с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи [3], вид модели которой на рис.1.

Методом масштабирования модель была настроена на частоты 2800 МГц, 8400 МГц и 11200 МГц, что соответствует S, C и X- диапазонам.

Суть метода – в изменении геометрических параметров структуры в K раз, где K – коэффициент масштабирования. Для более точной настройки на заданные частоты радиус ячейки связи бипериодической ускоряющей структуры уточнялся повторным масштабированием с введением дополнительного коэффициента масштабирования K_2 . Тогда введем коэффициент масштабирования ячейки связи модели: $K_{cop} = K * K_2$.

Рабочая частота	K	K_2	K_{cop}
8400 МГц	0.3402	1.1071	0.3644
11200 МГц	0.2552	1.1071	0.2733

Табл. 1. Результаты метода масштабирования структуры

Для модели каждого диапазона были рассчитаны электродинамические характеристики.

f, ГГц	Q	K, %	E_p^* , МВ/м	E_{zmax} , МВ/м	H_p^* , кА/м	$E_{pmax\ k1}$, МВ/м	$E_{acc\ 1k}$, МВ/м	ΔT^* , °C	$H_{p\Delta T < 50^\circ C}$, кА/м	E_{acc2k} , МВ/м
2.8	10514	9.1	165	75	367	<160	72.7	35	-	-
8.4	6138	9.87	851	380	1839	<220	98.2	151 8	330	68
11.2	5318	9.88	1301	580	2835	<250	111.5	417 7	310	63

Табл. 2. Сводная таблица электродинамических характеристик бипериодических ускоряющих структур

В таблице 2 приведены рассчитанные значения максимального электрического и магнитного поля на поверхности структуры E_p^* , H_p^* и максимального значения ускоряющего поля E_{zmax}^* на оси структуры при 1 Дж запасённой энергии. При проектировании структур необходимо учитывать три критерия: максимальное поле на поверхности структуры $E_{pmax\ k1}$ (данные получены в различных лабораториях и обеспечивают стабильность работы структуры не более 1 пробоя на 10^6 импульсов), импульсный нагрев и приведённый вектор Пойнтинга. Импульсный нагрев ΔT не должен превышать $50^\circ C$ за 1 импульс. При превышении данной величины возможно появление напряжений, деформации структуры и возникновение пробоев. В таблице 2 приведены полученные значения импульсного нагрева при длительности импульса 1,5 мкс. Приведённый вектор Пойнтинга в данной работе рассмотрен не был. Показано, что для данной конструкции величина ускоряющего поля ограничивается величинами $\sim 60 - 70$ МВ/м для исследуемых частотных диапазонов.

Список литературы

1. S.M. Polozov et al., Current Results of the 4th Generation Light Source USSR (Former SSRS4) Development, Proc. of RuPAC2018
2. S.M. Polozov et al., Beam dynamics simulation results in the 6 GeV top-up injection linac of the 4th generation light source USSR, Proc. of RuPAC2018, p.285
- 3.Е.А. Савин, Н.П. Собенин // Журнал технической физики, 2013, том 83, вып. 5, стр. 141-146.

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

СИСТЕМА ЭКСТРАКЦИИ ПУЧКА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ЛЕГКИХ ИОНОВ

Проведено моделирование системы экстракции и формирования пучка для лазерного источника легких многозарядных ионов. Выполнено моделирование динамики пучков ионов от лития до кислорода в экстракторе.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

BEAM EXTRACTION SYSTEM FOR LASER LIGHT ION SOURCE

The simulation of the beam extraction and formation system for a laser source of light multiple-charged ions has been carried out. The simulation of the beam dynamics of lithium to oxygen ions has been conducted in this research.

В работе предложена конструкция и представлены результаты численного моделирования системы экстракции пучка для лазерного источника легких многозарядных ионов. Выполнено моделирование системы экстракции пучка на основе пировской системы электродов и ускоряющей трубки. Схема расчетной модели, показанная на рис. 1, построена по аналогии с системой, приведенной в [1].

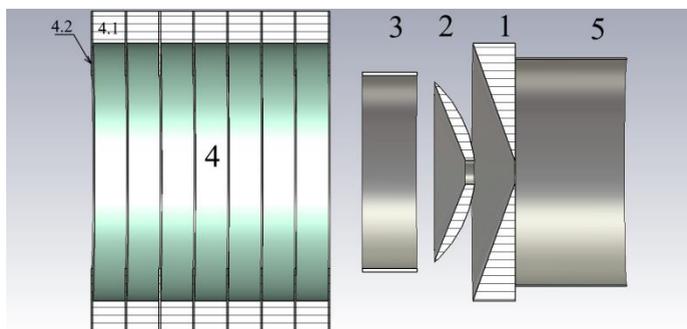


Рис.1 Схема расчетной модели экстрактора: 1 – плазменный электрод, 2,3 – извлекающие электроды, 4 – ускоряющая трубка, 4.1 – изолятор ускоряющей трубки, 4.2 – электрод ускоряющей трубки, 5 – трубка дрейфа

Проведена оптимизация углов наклона электродов к оси пучка, формы извлекающих электродов, межэлектродных расстояний по минимуму эмиттанса. Выполнено моделирование динамики пучков ионов в экстракторе.

На извлекающий и фокусирующий электроды экстракции может и быть подан ряд дискретных значений потенциала, что позволяет получать пучки как протонов, так и двухзарядных ионов гелия. На рис. 2 показаны полученные траектории пучка ионов O^{5+} . Результаты оптимизации параметров экстрактора для выходной энергии 40 кэВ/нуклон приведены в табл. 1.

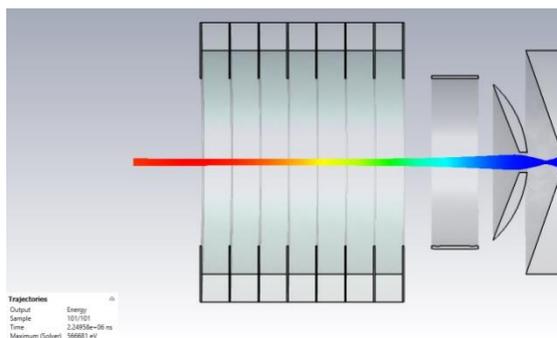


Рисунок 6.9 – Траектории пучка ионов O^{5+} в экстракторе

Табл. 1

Параметры пучка на выходе экстрактора

Элемент	Зарядность	Нормализованный эмиттанс, мм·мрад	Диаметр пучка, мм	Напряжение платформы, кВ
Литий	2	0,076	5,40	120
Бериллий	3	0,070	4,85	120
Бор	3	0,070	4,98	144
Углерод	4	0,069	4,82	120
Азот	4	0,063	4,89	140
Кислород	5	0,066	4,84	128

Список литературы

1. M. Okamura et al. Low Charge Laser Ion Source For The EBIS Injector// Proceedings of LINAC2014, Geneva, Switzerland. 2014.P. 64 – 66.

Н.Ю. САМАРОКОВ, Я.В. ШАШКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

**РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ВОЛН
ВЫСШЕГО ТИПА В УСКОРЯЮЩЕМ РЕЗОНАТОРЕ НА 350
МГц С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫВОДА
МОЩНОСТИ**

Рассмотрены два варианта подавления волн высшего типа (ВВТ) при помощи прямоугольных волноводов и гофрированных цилиндрических волноводов. Проведена их настройка, расчет электродинамических характеристика (ЭДХ) двух структур.

N.YU. SAMAROKOV, YA.V. SHASHKOV

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

**ESTIMATION OF THE DAMPING EFFICIENCY OF HOM
IN ACCELERATING CAVITY AT 350 MHZ USING
WAVEGUIDE POWER OUTPUT DEVICES**

Two options for damping HOM using rectangular waveguides and corrugated cylindrical waveguides were considered. Tuning, calculation of the electrodynamic characteristics (EDC) of the two structures was conducted.

Для источников СИ требуется сохранение низкого значения эмиттанса сильноточного непрерывно циркулирующего в кольце пучка электронов. Для решения этой задачи ускоряющие резонаторы должны оснащаться высокоэффективными системами подавления наводимых пучком электромагнитных ВВТ. Для ускоряющих резонаторов для накопительного кольца проекта ИССИ-4 [1, 2] предложены два варианта системы подавления ВВТ в резонаторах на основе конструкции предложенных для DAFNE [3], BESSY [4] и ESRF [5]. В обоих случаях используются три волновода, расположенных под углом 120 градусов друг относительно друга. На рис. 1 представлен общий вид ускоряющего резонатора с устройствами вывода ВВТ. Частота отсечки устройств вывода мощности должна быть выше 350 МГц (для предотвращения демпфирования основной волны), но ниже 482 МГц (частота первой ВВТ). Длина волноводов должна быть большой для предотвращения затухания основной волны в поглощающих нагрузках, расположенных в концах волноводов. В результате численного моделирования получены значения продольного и поперечного

шунтового сопротивления монопольных и дипольных видов колебаний для ускоряющего резонатора с рабочей частотой 350 МГц (рис. 2).

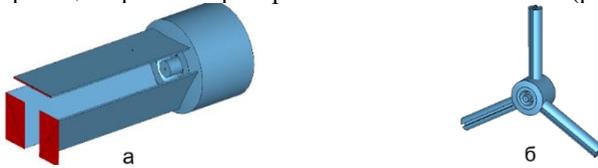


Рис. 1. Общий вид ускоряющего резонатора с тремя устройствами вывода ВВТ (а) прямоугольные волноводы, (б) гофрированные цилиндрические волноводы

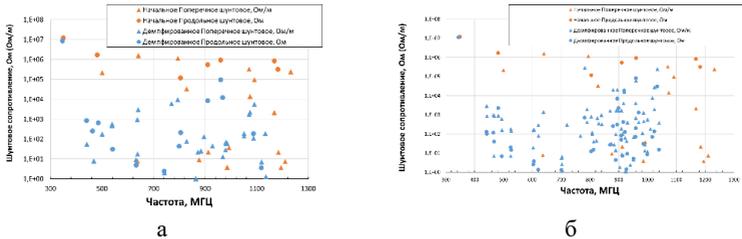


Рис. 2. Сравнение продольного и поперечного шунтового сопротивления ВВТ для ускоряющего резонатора на 350 МГц без устройств вывода ВВТ и с устройствами вывода ВВТ. (а) Структура с прямоугольными волноводами, (б) структура с гофрированными цилиндрическими волноводами.

Обе предложенные конфигурации позволяют существенно снизить (до необходимого по условиям влияния на динамику пучка) добротность ВВТ в широком частотном диапазоне. В дальнейшем планируется проведение детальной проработки конструктивных решений элементов системы подавления ВВТ для резонаторов проекта ИССИ4 на основе размещаемых на обечайке резонатора круглых волноводов с модифицированным профилем поперечного сечения.

Список литературы

1. S.M. Polozov et al., Current Results of the 4th Generation Light Source USSR (Former SSRS4) Development, Proc. of RuPAC2018
2. S.M. Polozov et al., Beam dynamics simulation results in the 6 GeV top-up injection linac of the 4th generation light source USSR, Proc. of RuPAC2018, p.285
3. S. Bartalucci et al., The RF Cavity for DAFNE, in Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference, Washington, June 1993
4. F. Marhauser et al, HOM Damped 500 MHz Cavity Design for 3rd Generation SR Sources. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago (2001)
5. V. Serrière et al., 352.2 MHz HOM damped normal conducting ESRF cavity: design and fabrication, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, p. 68

К.И. КОЗЛОВСКИЙ, О.В. ДЕРЯБОЧКИН, А.П. МЕЛЕХОВ,
А.Е. ШИКАНОВ, Е.Д. ВОВЧЕНКО

Национальный Исследовательский Ядерный Университет («МИФИ»), Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Импульсное магнитное поле спиральной катушки индуцирует в лазерной плазме вихревой ток, увеличивающий степень ее ионизации. Азимутальная составляющая этого тока взаимодействует с радиальной составляющей магнитного поля и создает силу Ампера, позволяющую формировать узконаправленный поток ионов.

K.I. KOZLOVSKY, O.V. DERYABOCHKIN, A.P. MELEKHOV,
A.E. SHIKANOV, E.D. VOVCHENKO

National research nuclear university MEPHI (Moscow engineering physics institute)

STUDY OF THE PARAMETERS OF LASER PLASMA IONS UNDER IMPACT OF A PULSED MAGNETIC FIELD

The pulsed magnetic field of the spiral coil induces an eddy current in the laser plasma and this current increases the degree of its ionization. The azimuthal component of this current interacts with the radial component of the magnetic field and creates an Ampere force, which allows the formation of a narrowly directed ion flux.

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследования влияния импульсного магнитного поля спиральной катушки на ионы лазерной плазмы [1]. На рисунке 1 приведена схема установки.

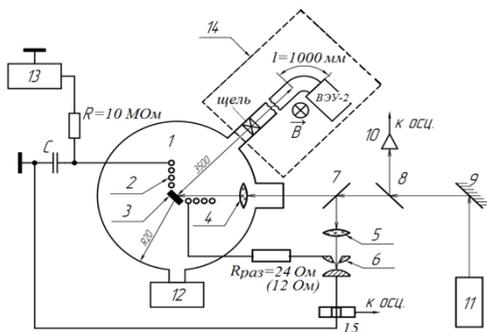


Рис. 1. Схема

эксперимента:

- 1 – вакуумная камера;
- 2 – спиральная катушка;
- 3 – лазерная мишень;
- 4, 5 – фокусирующие линзы
- 6 – разрядник;
- 7, 8 – светоделительные пластины;
- 9 – зеркало ($R = 100\%$);

10 – фотоэлемент;
 11 – импульсный Nd-лазер;

Для фокусировки лазерного пучка используются линзы (поз. 4 и 5) с фокусным расстоянием 100 мм. Вакуумный пост (поз. 12) предназначен для откачки и контроля давления в рабочей камере. С помощью высоковольтного блока питания (поз. 13) осуществляется зарядка накопительной емкости ($U \leq 15$ кВ) для возбуждения тока в спиральной катушке. В систему диагностик входят масс-спектрометр (поз. 14) и пояс Роговского (поз.15).

На рисунке 2, представлены экспериментальные результаты, полученные для энергии лазера $E_{\text{лазер}} \approx 450$ мДж. Исследуемый образец – пластина из Al с добавкой 5% Mg.

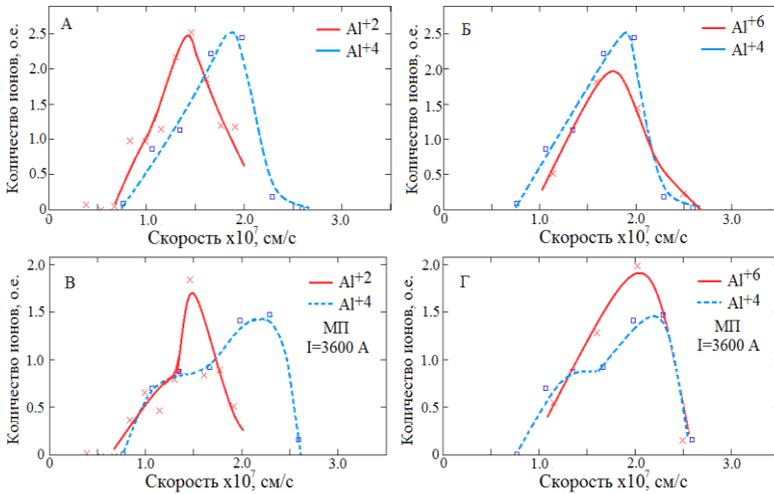


Рис. 2. Распределения ионов Al⁺², Al⁺⁴, Al⁺⁶ лазерной плазмы по скорости: без магнитного поля (а, б); с магнитным полем при токе в катушке 3,6 кА (в, г)

Из графиков на рисунке 2 видно, что импульсное магнитное поле (МП) *ускоряет* ионы Al⁺⁴, Al⁺⁶ от $v_{\text{сред}} \approx 1,9 \cdot 10^7$ см/с до $v_{\text{сред}} \approx 2,4 \cdot 10^7$ см/с. Кроме того, для этих ионов происходит обострение переднего фронта. Также, при наложении МП количество ионов Al⁺² уменьшается примерно в 2 раза, а количество ионов Al⁺⁴, Al⁺⁶ почти не меняется.

К.Г.АРТАМОНОВ, М.С.ДМИТРИЕВ, М.И.ЖИГАЙЛОВА,
В.И. РАЩИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ

Проведено моделирование магнитных систем ЭЦР-источников на постоянных магнитах с рабочими частотами 2,45 ГГц и 10 ГГц, предназначенных для получения протонов, двухзарядного гелия и других многозарядных ионов. Предложены разновидности конфигураций магнитной системы для источников обоих диапазонов рабочих частот. Исследованы осевое и радиальное распределения магнитного поля, значения поля на границе плазменной камеры, а также в области инжекции и экстракции для различных марок NdFeB магнитов, а также для материала N45 при деградации магнитов на 10%. Было оценено положение ЭЦР поверхности, а также другие параметры поля, с учетом 10% деградации магнитов.

K.G. ARTAMONOV, M.S. DMITRIEV, M.I. ZHIGAYLOVA,
V.I. RASCHIKOV

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

SIMULATION OF THE MAGNETIC SYSTEMS OF AN ECR ION SOURCE

The simulation of a magnetic system has been carried out for ECR ion sources based on permanent magnets with operating frequencies of 2.45 GHz and 10 GHz for producing protons, double-charged helium and other multiple-charged ions. Several types of the magnetic system configuration for both operating frequencies were suggested. The axial and the radial distributions of the magnetic field are investigated for the values at the boundaries of the plasma chamber and for both the injection and the extraction regions in consideration of various types of NdFeB magnets. The ECR region location as well as the other field parameters were estimated with allowance made to the magnetic degradation of 10 percent.

В работе проводилось моделирование магнитных систем для ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц, предназначенного для получения протонов и слаботочных пучков двухзарядных ионов гелия, и ЭЦР источника с рабочей частотой 10 ГГц для получения протонов, двухзарядного гелия, а также других многозарядных ионов. Профиль магнитного поля в плазменной камере важен как для обеспечения

нагрева плазмы, так и для повышения надежности и стабильности работы источника. В случае необходимости получения многозарядных ионов необходимо применять резонансные источники со ступенчатой ионизацией. Предложены разновидности конфигураций магнитной системы для источников обоих диапазонов рабочих частот. Модель магнитной системы ЭЦР источника на 2,45 ГГц показана на рис. 1.

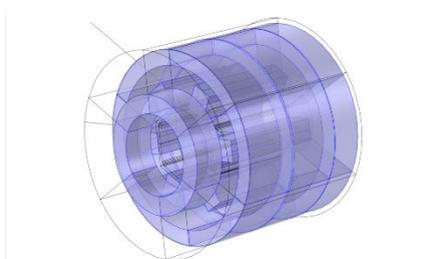


Рис. 1 Магнитная система ЭЦР источника на частоту 2,45 ГГц

Проведенные расчеты включают исследование изменения характеристик системы (распределения магнитного поля по оси Z, радиального распределения магнитного поля, значений поля на границе камеры, значений осевого распределения поля в области инжекции и экстракции – B_{inj} и B_{ext} соответственно) для различных марок неодимовых магнитов. Исследовано изменение характеристик магнитного поля и положение ЭЦР области при деградации свойств на 10% (рис. 2).

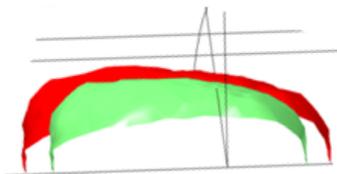


Рис. 2 ЭЦР поверхность в расчетном секторе (30°) при деградации магнитов марки N45 (красная область) в сравнении с начальными характеристиками (зеленая область)

В соответствии со значением ПДУ постоянного магнитного поля по нормативным требованиям СанПиН 2.2.4.1191-03 предложены варианты экранов магнитных систем с оптимальными значениями толщины.

М.С. ДМИТРИЕВ, А.С. КРАСНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ПЛАЗМЕННАЯ КАМЕРА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ЭЦР ИСТОЧНИКА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц

Рассмотрены результаты моделирования электродинамических характеристик плазменной камеры для ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц. Показана возможность возбуждения СВЧ колебаний в цилиндрическом резонаторе диаметром 50 мм с полукруглыми вставками.

M.S. DMITRIEV, A.S. KRASNOV

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

PLASMA CHAMBER FOR A COMPACT 2.45 GHZ ECRIS

The results of modeling the plasma chamber electrodynamic properties for the 2.45 GHz ECRIS are considered. The possibility of the excitation of microwave oscillations in cylindrical resonator with diameter of 50 mm and semicircular inserts is shown.

Диаметр плазменной камеры является одним из важнейших факторов, влияющих на плотность плазмы и, в конечном итоге, на ток ионов. Для эффективной передачи СВЧ мощности радиус плазменного резонатора не должен быть меньше чем $\lambda_{кр}/\pi$, где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны для H_{11} вида колебаний в цилиндрическом резонаторе. Следовательно, минимальный диаметр камеры составляет 78 мм для частоты 2,45 ГГц.

Для создания малогабаритного ЭЦР источника в качестве плазменной камеры предлагается использовать цилиндрический резонатор с внутренним диаметром 50 мм, имеющим две диаметрально противоположенные полукруглые вставки. В этом случае поперечное сечение плазменной камеры будет являться аналогом Н-образного волновода, и иметь большую критическую длину волны, чем круглый волновод того же диаметра. Поперечное сечение модели показано на рис. 1.

Выполнено численное моделирование электродинамических характеристик ненагруженной плазменной камеры. Проведено моделирование ввода СВЧ мощности в камеру. Получены зависимости резонансных частот на 12 низших видах колебаний от длины камеры, радиуса и положения вставок. Распределение электрического поля в камере на виде колебаний H_{11} показано на рис. 2. Графики некоторых

зависимостей резонансных частот от длины камеры приведены на рис. 3.

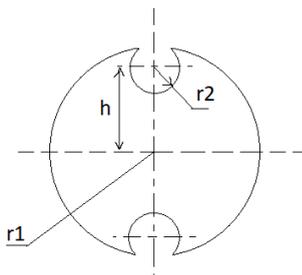
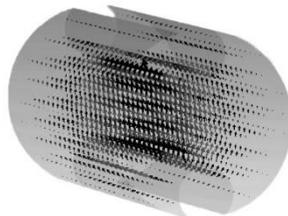


Рис. 1 Поперечное сечение модели камеры



Mode 1 E-Field
 Frequency 2.46107 GHz
 Phase 0°
 Maximum (Pk) 5.6158e-07 V/m

Рис. 2 Распределение электрического поля на виде колебаний H_{11}

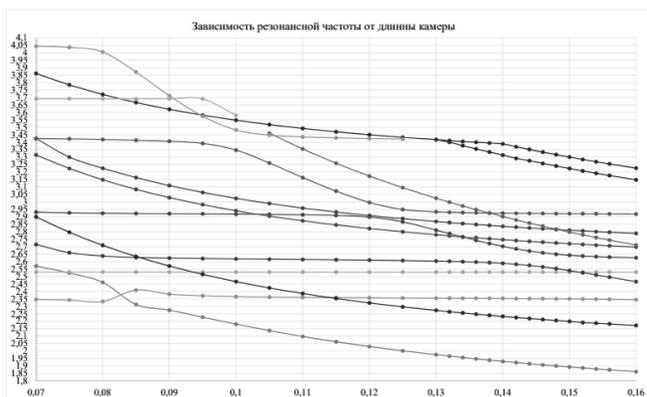


Рис. 3. Зависимости резонансных частот от длины камеры

Полученные результаты могут быть использованы при разработке плазменной камеры для малогабаритного ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц.

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОГО СОГЛАСОВАТЕЛЯ НА ЧАСТОТУ 2,46 ГГц

На основе прямоугольного волновода WR-340 разработан трехшлейфовый штыревой согласователь на рабочую частоту 2,46 ГГц, позволяющий согласовать нагрузку с источником СВЧ-мощности. Исследованы различные варианты конструкции бесконтактных подстроечных штырей с дроссельным вводом.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, S.A. TUMANOV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF THE WAVEGUIDE 2.46 GHz TUNER

A triple-stub tuner based on a rectangular waveguide WR-340 with operating frequency of 2.46 GHz has been developed to provide the load-source impedance matching for the microwave power source. Various types of design of non-contact tuning stubs comprising a microwave choke have been investigated.

В силу существенной зависимости входного сопротивления плазменных камер ЭЦР источников ионов от характеристик разрядной плазмы в системах СВЧ питания необходимо использовать перестраиваемые согласующие элементы, позволяющие в ручном или автоматизированном режиме осуществлять согласование импедансов нагрузки и волноводной линии передачи. Наиболее распространенной конструкцией является трехшлейфовый волноводный согласователь, в котором в качестве подстроечных элементов используются три емкостных штыря.

При создании системы СВЧ питания малогабаритного ЭЦР источника с рабочей частотой 2,46 ГГц на основе прямоугольного волновода WR-340 был разработан трехшлейфовый штыревой согласователь, который позволяет согласовать нагрузку с СВЧ генератором. Согласование обеспечивает высокий КПД передачи СВЧ мощности в плазменную камеру источника, а также для стабильности мощности и частоты колебаний в тракте.

Построена математическая модель трехшлейфового штыревого согласователя, расстояние между штырями которого, составляющее 43,5 мм, соответствует четверти длины волны в прямоугольном волноводе. Штыри представляют собой металлические цилиндры

диаметром 20 мм, размещаемые в поперечном сечении волновода на широкой стенке. Глубина погружения штырей регулируется от 0 до 40 мм. Внешний вид модели показан на рис. 1.

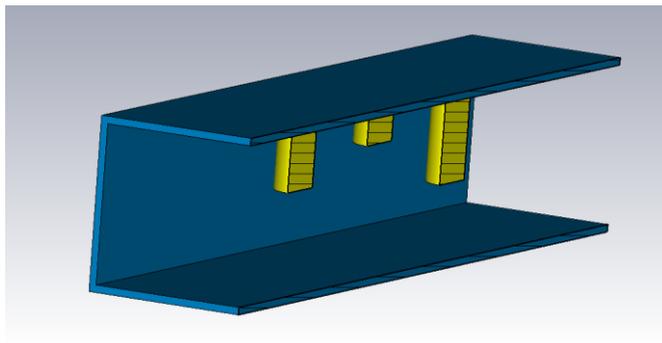


Рис. 1 Модель волноводного согласователя в разрезе.

Для согласования одновременно используются только два соседних штыря. Каждая пара обеспечивает согласование на половине круговой диаграммы сопротивлений нагрузки. Показано, что с использованием согласователя для нагрузки в виде короткозамкнутого отрезка волновода может быть обеспечено значение КСВН до 1,05. Положение подстроечных элементов согласователя может быть рассчитано по результатам измерения коэффициента отражения от нагрузки [1].

Штыри согласователя не должны иметь контакта со стенками волновода. При этом электрический контакт и отсутствие излучения в окружающее пространство обеспечивается дроссельным соединением штыря с волноводом. Рассмотрены несколько вариантов конструкции такого соединения, выполнено численное моделирование его характеристик.

Список литературы

1. Y. Kuang et al, A Tuning Method for Triple-Stub Tuner using Knowledge-Based Surrogate Model, Proc. of 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Guangzhou, China, 2019, doi: 10.1109/ICMMT45702.2019.8992397.

Н.М. КРИСТИ, А.И. МАРЧЕНКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ,
П.А. ФЕДИН, К.Е.ПРЯНИШНИКОВ
НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ВТОРОГО ИНЖЕКТОРА ИОНОВ H^+ He^+

В современных ядерных установках существует проблема износа конструкционного материала под воздействием нейтронного потока. Под действием нейтронов в материале возникают дефекты кристаллической решетки и происходит накопление продуктов трансмутации (гелия и водорода) в структуре материала. В НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ ведутся работы по изучению радиационной стойкости новых материалов в имитационных экспериментах на ионных пучках. В рамках имитационных экспериментов формирование дефектов производится пучком ускоренных тяжелых (Fe, Ti, V) ионов на ускорителе ТИПр. Для имплантации в исследуемую область гелия и водорода на установке ТИПр проектируется второй канал. Для разработки вакуумной системы второго инжектора ионов H^+ и He^+ , канала транспортировки и мишенной камеры, использовались средства программного продукта MolFlow, разработанной в CERN. Моделирование вакуумной системы проводится с условием повышенной газовой нагрузки с ECR источника, вызванной натеканием газа при получении плазмы. На основе моделирования вакуумной системы определены параметры форвакуумных и высоковакуумных насосов и предполагаемые места их расположения на установке.

А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Рассматриваются основные подходы к моделированию методом Монте-Карло вакуумной системы с помощью программы Molflow+, оценке уровня вакуума в элементах вакуумной системы по объему и на траектории движения заряженных частиц. Приводятся особенности расчета вакуумных характеристик отдельных конструктивных элементов в составе вакуумных камер ускорителей. Даны примеры моделирования распределения давления в камерах объемных резонаторов, соединительных вакуумпроводов и протяженных вакуумных трактов.

A.S. PANISHEV, S.M. POLOZOV, V.L. SHATOKHIN
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

A LINEAR ACCELERATOR VACUUM SYSTEM ELEMENTS MODELLING

The basics of Monte Carlo simulation of a vacuum system using the Moldflow + program are considered. The vacuum level in the elements of the vacuum chambers and on the trajectory of the charged particles is estimated. The calculation properties of the individual structural elements vacuum characteristics in the composition of the vacuum chambers of accelerators are given. Examples of the pressure distribution in resonators chambers, connecting vacuum pipes and extended vacuum tracts modeling are given.

Для определения параметров вакуумного оборудования линейного ускорителя выполнено моделирование с помощью программы Molflow+, использующей метод Монте-Карло [1]. Для расчета характеристик вакуума в расчетной модели необходимо задать геометрию поверхностей, обращенных в вакуум, газовые нагрузки и параметры откачного оборудования.

Резонаторные системы линейного ускорителя представляют самостоятельные вакуумные системы (ВС), разделяемые на секции линейными изолирующими вакуумными затворами. Ускоряющие структуры соединяются каналами транспортировки. Подключение вакуумных насосов к камерам резонаторов осуществляется с помощью вакуумных портов. В них устанавливаются решетки для ограничения проникновения СВЧ мощности за пределы камеры резонатора, а также

вакуумные изолирующие затворы. Эти особенности конструкции влияют на вакуумную проводимость и снижают скорость эффективной откачки насосов. Была выполнена оценка их проводимости в рабочем режиме. Проводимость порта ДУ160 с решетками составила от 1370 л/с до 1040 л/с в зависимости от высоты порта.

По результатам моделирования откачки в программе Mollflow+ были получены распределения давления для разных резонаторных структур, исследовано влияние расположения насосов на профили давления. Для резонаторов Н-типа наблюдалось повышение давления в соединительном трубопроводе, что объясняется особенностью конструкции электрода на входе вакуумного тракта в резонатор – малой проводимостью входного отверстия (около 5 л/с). С целью уменьшения этого эффекта на расчетной модели был проведен анализ газовых потоков на входе резонатора в зависимости от быстроты откачки. Рассмотрены различные формы электрода, способные увеличить его проводимость. Использование вариантов с расточкой внутреннего диаметра до 24 мм и расточкой под конус позволило снизить давление в трубопроводе на 15%. Кроме этого, была рассмотрена возможность уменьшения газовых потоков со стенок трубопровода за счет уменьшения площади. Для этого была исследована зависимость давления в соединительном трубопроводе от его диаметра.

С учетом рассмотренных этих факторов были предложены возможные варианты схемы высоковакуумной откачки с комбинацией типов высоковакуумных насосов. Для каждой структуры смоделирована откачка в Mollflow+ и получены профили распределения давления вдоль траектории пучка.

Отдельно были смоделированы условия откачки вакуумных камер группирователей и протяженных каналов транспортировки пучка. Для откачки объемов группирователей предложена система откачки с автономными вакуумными постами. Выполнена оптимизация расстояния подключения насосов в длинных каналах с помощью моделирования, которое сравнивалось с результатами аналитического расчета. С учетом выбранного расстояния была составлена модель тракта и получено распределение давления вдоль всех участков тракта.

Список литературы

1 Mollflow+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/<https://mollflow.web.cern.ch/content/about-mollflow>.

Н.Н. БОГАЧЕВА, П.А. ФЕДИН, А.В. КОЗЛОВ,
Т.В. КУЛЕВОЙ

Институт теоретической и экспериментальной физики – Москва, Россия

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В МИШЕННОЙ КАМЕРЕ

Исследованы процессы теплопередачи в мишенной камере являющейся частью ускорителя ТИПр. Моделирование теплопереноса реализовано в программе Comsol Multiphysics. Рассматривались такие механизмы теплопереноса, как теплопроводность, конвекция и излучение. Получены данные об изменении и распределении температуры на поверхности изучаемых образцов. Исследуемые процессы изучались в стационарном режиме и во временной области.

N.N. BOGACHEVA, P.A. FEDIN, A.V. KOZLOV,
T.V. KULEVOY

Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

ANALYSIS OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE TARGET CHAMBER.

The processes of heat transfer in the target chamber, which is a part of the TИPr accelerator, have been investigated. Heat transfer simulation is implemented in the Comsol Multiphysics program. Such mechanisms of heat transfer as heat conduction, convection and radiation were considered. Data were obtained on the change and distribution of temperature on the surface of the samples under study. The investigated processes were studied in a stationary mode and in the time domain.

Мишенная камера используется в ускорителе ТИПр для размещения внутри нее группы исследуемых образцов и их дальнейшего облучения тяжелыми ионами. С помощью таких экспериментов изучается радиационная стойкость материалов, используемых в ядерных реакторах. Конструкция мишенной камеры обеспечивает нагрев образцов до 700°C нагревателем средней мощностью 100 Вт. Контроль нагрева производится термомпарами, установленными вблизи нагревателя и подложки с образцами. На поверхности мишенной камеры предусмотрена система водяного охлаждения. Таким образом мы имеем технологический процесс, который сопровождается комплексным переносом теплоты и включает

в себя такие механизмы теплопереноса, как теплопроводность, конвекция и излучение.

Для моделирования процессов теплопередачи успешно применяется программа Comsol Multiphysics [1]. Она позволяет выполнить тепловые расчеты, сделать анализ потоков тепла и распределение температур в устройствах, а также связать несколько физических воздействий в одной модели.

В условиях сверхвысокого вакуума конвективный процесс теплообмена не играет существенную роль, поэтому процесс теплопередачи за счет молекул разреженного воздуха внутри камеры не был учтен.

Рассмотрены процессы переноса тепла за счет теплопроводности в материале мишенной камеры, перенос тепла излучением, который существенно влияет на распределение температур из-за их большого перепада на границах нагреваемой и охлаждаемой областей, и был учтен съем тепла с цилиндрической поверхности мишенной камеры за счет принудительного охлаждения водой, предусмотренный в конструкции камеры. Проанализирован процесс температурного воздействия пучка заряженных частиц на исследуемые образцы. Выполнен расчет нагрева в момент действия импульса пучка.

Приведены графики нагрева и охлаждения поверхностей камеры и образцов, приведены значения основных констант, используемых в процессе моделирования. В исследовании с помощью программы Comsol Multiphysics были успешно связаны все тепловые воздействия в одной модели и получены результаты нагрева камеры согласующиеся с экспериментальными данными.

Список литературы

1. <https://www.comsol.ru/>
2. Bejan, Adrian. Heat Transfer Handbook. Wiley, p 175
<http://site.ebrary.com/id/10226699?ppg=175>

П.А. ФЕДИН, В.К. СЕМЯЧКИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ,
А.В. КОЗЛОВ, Р.П. КУЙБИДА, Т.В. КУЛЕВОЙ
НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ, Москва, Россия

ПРОЕКТ МИШЕННОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОБЛУЧЕНИЙ ОБРАЗЦОВ ДВУМЯ ПУЧКАМИ ИОНОВ 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 экспериментальной базы и планируется создание второго канала на установке ТИПр для одновременного облучения исследуемых образцов тяжелыми ионами (Fe, V, Ti или др.) и ионами H и He. Имплантация ионов H или He в образцы одновременно с облучением тяжелыми ионами позволяет моделировать влияние продуктов ядерных реакций (водорода и гелия) на свойства материала. В докладе представлен проект мишенной камеры, обеспечивающей проведение экспериментов с одновременным облучением исследуемых образцов пучками тяжелых ионов и имплантации ионов водорода и гелия в исследуемую область образца.

P.A. FEDIN, V.K. SEMYACHKIN, K.E. PRYANISHNIKOV,
A.V. KOZLOV, R.P. KUIBEDA, T.V. KULEVOY
¹NRC "Kurchatov institute" – ITEP, Moscow, Russia

DESIGN OF A TARGET CHAMBER FOR IRRADIATING SAMPLES WITH TWO ION BEAMS FOR NEUTRON INFLUENCE SIMULATION

Simulation experiments on structural steels irradiation with heavy-ion beams are in demand as an express-method for analysis of the materials radiation resistance. At the NRC "Kurchatov Institute" - ITEP the experiments are in progress at the HIPr heavy-ion accelerator. As part of the improvement of experimental facility, a second channel at the HIPr accelerator for simultaneous irradiation by heavy ions (Fe, V, Ti or other) beam and H and He ions one is under development. The H and He ions implantation enables the investigation of nuclear reaction products on the material features. The report presents a target chamber design for the implantation of H or He ions in specimens simultaneously with heavy ions irradiation.

Облучение ионами может использоваться для экспресс-анализа радиационной стойкости реакторных материалов. При этом ионное облучение не активизирует материалы и позволяет набирать дозы

Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А. П. СКРИПНИК,
А.Е. ШИКАНОВ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва,
Россия*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЯ КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТА ПО ДАНЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ

Описан алгоритм восстановления поля кольцевого магнита методом наименьших квадратов по данным измерения вектора индукции. Приведены результаты компьютерного эксперимента.

V.D. VOVCHEENKO, K.I. KOZLOVSKIY, A.E. SHIKANOV,
A.P. SKRIPNIK, E.Y. SHKOLNIKOV
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

RECONSTRUCTION OF RING MAGNET FIELD FROM VECTOR INDUCTION MEASUREMENTS

Algorithm of reconstruction of ring magnet field from vector induction measurements by least squares method was described. Computer experiment results were presented.

Проведено исследование поля кольцевого магнита в виде тела, ограниченного цилиндрическими поверхностями $r = R_{1,2}$, и плоскостями $-H/2 < z < H/2$. При продольной намагниченности магнит с такой геометрией может эффективно использоваться в малогабаритных ускорительных нейтронных трубках для подавления электронной проводимости. Пространственное распределение создаваемого им вектора индукции может быть представлено в виде суперпозиции полей молекулярных токов I_n ($n = 1 \div N$), протекающих по частичным кольцевым поверхностям с координатами $\mathbf{r}_n = (r_n, z_n)$, на которые разбиваются внутренняя и внешняя цилиндрические, а также правая и левая торцевые поверхности магнита. Совокупность чисел I_n задает вектор \mathbf{I} размерности N .

Поле вектора индукции может быть представлен в виде:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, \mathbf{I}) \cong \sum_{n=1}^N I_n \mathbf{b}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_n), \quad (1)$$

где $\mathbf{b}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_n)$ – вектор индукции, создаваемой тонким кольцевым единичным током, определяемым координатой \mathbf{r}_n , в точке пространства с радиусом вектором \mathbf{r} . Выражения для его компонентов в цилиндрической системе координат приводятся в работе [1]. Для определения коэффициентов I_n в выражении (1) было проведено измерение компонентов вектора индукции в точках пространства, окружающего магнит, с радиусами векторами \mathbf{r}_k ($k = 1 \div K$).

Результатами измерений являются значения вектора индукции $\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{r}_k)$ в этих точках.

Нахождение искоемых коэффициентов I_n осуществлялось методом наименьших квадратов путем минимизации квадратичной формы

$$W(\mathbf{I}, \gamma) = \sum_{k=1}^K [B_z(\mathbf{r}_k, \mathbf{I}) - \tilde{B}_z(\mathbf{r}_k)]^2 + \gamma \|\mathbf{I}\|^2.$$

где γ - параметр регуляризации по Тихонову [2]. Исследовался магнит с геометрическими параметрами $R_1 = 0.0225\text{м}$, $R_2 = 0.425\text{м}$, $H = 0.04\text{м}$.

Из условия экстремума
$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{I}} W(\mathbf{I}, \gamma) = 0$$

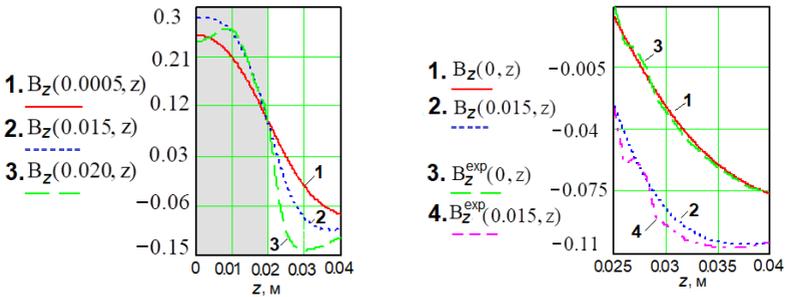
вытекает следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{n=1}^N I_n (G_{mn} + \gamma \delta_{mn}) = F_m, m = 1..N,$$

где
$$G_{mn} = \sum_{k=1}^K b_z(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_m) b_z(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_n), F_m = \sum_{k=1}^K b_z(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_m) \tilde{B}_z(\mathbf{r}_k).$$

Коэффициент регуляризации подбирался в процессе компьютерного эксперимента. При этом было установлено его оптимальное значение $\gamma \sim 10^{-9}$.

На рисунках, представленных ниже, приводятся результаты восстановления продольного компонента вектора индукции магнитного поля $B_z(r, z)$ и сравнения восстановленных значений с измеренными в эксперименте: $B_z^{\text{exp}}(0, z)$, $B_z^{\text{exp}}(0.015, z)$.



Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, 1982, 624 с.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1986, 186 с.

М.И. ЛИСОВСКИЙ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.А. ШИКАНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ КВАНТОВ, ТЕРАГЕРЦОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УСКОРЕНИЯ ДЕЙТРОНОВ

В докладе представлен обзор по портативным управляемым источникам электронных потоков перспективным с точки зрения генерации рентгеновских квантов, терагерцового электромагнитного излучения и коллективного ускорения дейтронов для генерации нейтронов.

M.I. LISOVSKI, K.I. KOZLOVSKY, E.A. SHIKANOV
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

SMALL-SIZED PULSED ELECTRON SOURCES FOR THE GENERATION OF X-RAY QUANTA, TERAHERTZ ELECTROMAGNETIC RADIATION AND DEUTERON ACCELERATION

The report presents an overview of portable controlled sources of electron beams that are promising from the point of view of the generation of X-ray quanta, terahertz electromagnetic radiation and collective acceleration of deuterons for the generation of neutrons

Для решения задач дистанционного дефектоскопического контроля оптимальным является применение портативных импульсных генераторов рентгеновских квантов (ИГРК) на базе импульсных рентгеновских ускорительных трубок (УТ). Такие источники излучения обеспечивают на расстоянии \sim м от мишени среднюю мощность экспозиционной дозы на уровне ~ 10 мР/с при минимальной площади излучающей поверхности мишени. Указанные параметры достигаются при генерации рентгеновских квантов в вакуумных диодных УТ, работающих в импульсно-периодическом режиме при амплитуде тока ускоренных электронов \sim кА, длительности импульса $\sim (1-10)$ нс, и максимальной энергии электронов в нескольких сотен кэВ.

В докладе дается обзор работ, где в качестве источников электронных потоков для генерации четкого рентгеновского изображения используются диодные системы с внутренним игольчатым анодом и аксиальным ускорением электронов, позволяющие образовывать взрывоэмиссионную плазму, с высокой электронной плотностью.

Одним из способов обеспечения безопасности является поиск и идентификация взрывчатых веществ, взрывных устройств на их основе и поиск иных предметов, которые могут быть использованы в качестве оружия. Поиск и проведение досмотровых мероприятий могут быть осуществлены различными методами. Наиболее перспективными представляются методы в которых обнаружение опасных предметов осуществляется с помощью терагерцового (ТГц) излучения, а также при использовании импульсных нейтронных полей.

В докладе обсуждаются работы, в которых генерацию ТГц- излучения предлагается осуществлять в генераторах гиротронного, а также викакторного типа.

Для создания импульсных нейтронных полей обсуждается, на основании анализа опубликованных работ, возможность использования импульсно- периодических потоков дейтронов, коллективно ускоренных при заперении прямых электронных потоков в проводящей полости.

В таких системах ускорения можно получать потоки дейтронов с максимальной энергией в спектре, превышающей 50 кэВ. Это говорит о принципиальной возможности применения подобного рода малогабаритных ускорителей в качестве портативных импульсных генераторов нейтронов (ИГН) на основе ядерных реакций $D(d, n)^3\text{He}$ и $T(d, n)^4\text{He}$, в которых, в отличие от ИГН на основе методов прямого ускорения дейтронов, отсутствуют ограничения на нейтронный выход, связанные с влиянием пространственного заряда и эмиссионного тока электронов на плотность тока дейтронов и эффективность их ускорения, а также КПД использования внешних импульсных накопителей электрической энергии, питающих ускоряющую систему.

Ускоренные до энергий 0,1 – 2,0 МэВ дейтроны, бомбардируя нейтронообразующую мишень, вызывают протекание различных ядерных реакций с испусканием нейтронов с длительностью импульса 20 - 50 нс. Количество ускоренных дейтронов при этом по расчетам должно достигать $\sim 10^{14}$ за импульс, а выход нейтронов различной энергии в зависимости от выбора нейтронообразующей мишени может составить $\sim 10^9$ в импульсе длительностью ~ 30 нс.

Создание рассмотренных малогабаритных источников электронов предполагает одновременную разработку эффективных высоковольтных генераторов. В докладе обсуждаются различные схемы их реализации на основе трансформаторов «Тесла», генераторов Аркадьева- Маркса, а также двойных формирующих линий. Приводятся описания таких генераторов, разработанных в НИЯУ МИФИ.

Секция Электрофизическое и ядерное приборостроение

Руководитель секции

– Юрков Дмитрий Игоревич
к.т.н., зав. кафедрой 24

Секретарь секции

– Масленников Сергей Павлович
д.т.н., профессор кафедры 24

Тел./факс: 8 (495) 788-56-99, доб. 9796

E-mail: SPMaslennikov@mephi.ru

А.А. АЛТУХОВ¹, К.В. ЗАХАРЧЕНКО¹, Р.Ф. ИБРАГИМОВ²,
В.А. КОЛЮБИН¹, С.А. ЛЬВОВ¹, Е.М. ТЮРИН²

¹ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест»

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

БОРТОВОЙ МОНИТОР КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Разработан монитор космического излучения на основе алмазных детекторов для долговременных космических миссий. Проведены испытания опытных образцов на стойкость к воздействию механических, тепловых и радиационных нагрузок. Выполнена калибровка аппаратуры.

А.А. ALTUKHOV¹, К.В. ZAKHARCHENKO¹,
R.F. IBRAGIMOV², V.A. KOLYUBIN¹, S.A. LVOV¹, E.M.
TYURIN²

*Industrial Technological Center “UralAlmazInvest”, Ltd, Moscow, Russia
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

ONBOARD MONITOR OF SPACE RADIATION BASED ON DIAMOND DETECTORS

A space radiation monitor based on diamond detector for long-term space missions has been developed. The prototypes have been tested to mechanical, thermal and radiation loads. Calibration of the equipment has been carried out.

Обеспечение безопасности долговременных космических миссий требует разработки аппаратуры для регистрации космического излучения с высокой стойкостью к воздействию тепловых, механических и радиационных нагрузок и сроком службы не менее 15 лет. Требуемыми характеристиками обладает аппаратура на основе алмазных детекторов [1, 2].

В данной работе представлен монитор космического излучения на основе алмазных детекторов (далее – монитор). Монитор предназначен для контроля радиационной обстановки снаружи космического аппарата.

В мониторе используется пять каналов регистрации. Каждый канал состоит из алмазного детектора, усилительного каскада, включающего пять амплитудных дискриминаторов, и пяти счетчиков частиц, регистрирующих сигналы детектора пяти амплитудных диапазонов.

Перед детекторами установлены фильтры различной толщины, что обеспечивает предварительную селекцию регистрируемого излучения.

Совместная обработка показаний всех счётчиков частиц позволяет восстановить спектры ионизирующих излучений различных видов и прогнозировать динамику радиационной обстановки вблизи космических аппаратов, в частности, большие солнечные события.

Монитор разработан на элементной базе отечественного производства. В рамках выполненных опытно-конструкторских работ были успешно проведены испытания опытных образцов монитора на воздействие механических, тепловых и радиационных нагрузок. Выполнена калибровка монитора с помощью образцовых источников бета-излучения и нейтронного излучения нейтронного D-T генератора.

В настоящее время начато проектирование новой модификации монитора с применением электронных компонентов на основе базовых матричных кристаллов и обработкой измерительных данных с применением нейросетевого подхода [3]. Тем самым будет обеспечено существенное повышение надёжности аппаратуры, а также увеличение точности восстановления спектров космического излучения. Также начата разработка уточненной физико-математической модели монитора для обучения нейронной сети.

Работа выполнена при частичной поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям), Проект № 61893

Список литературы

1. Kania D.R., Landstrass M.I., Plano M.A., Pan L.S., Han S. // *Diamond and Related Materials*. 1993. Vol. 2, P. 1012 – 1019.
2. Zakharchenko K.V., Altukhov A.A., Ibragimov R.F., Kolyubin V.A., Lvov S.A., Tyurin E.M. // *Proceedings of the Tenth Moscow Solar System Symposium*. 2019. P. 285–287.
3. Истратов А.Ю., Захарченко К.В., Каперко А.Ф., Колобин В.А., Кулагин В.П., Курочкин Р.И. // *Измерительная техника*. 2016. №3, С. 49–54.

П.Г. ВАСИЛЬЕВА, С.П. МАСЛЕННИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ
ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯТОРА ЗА СЧЕТ
ФРАГМЕНТИРОВАННОСТИ ДЕТЕКТОРА И
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WLS-СВЕТОВОДОВ**

В работе представлены результаты численных исследований влияния фрагментации сцинтиллятора большого объема на временное разрешение детектора при использовании зеленых WLS-световодов.

P.G. VASILUEVA, S.P. MASLENIKOV

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

**STUDY OF THE POSSIBILITY OF REDUCING
SCINTILLATOR'S TIME RESOLUTION DUE TO
FRAGMENTATION OF DETECTOR AND USING WLS-
FIBERS**

The paper presents the results of numerical studies of the effect of fragmentation of a large-volume scintillator on the temporal resolution of the detector with using green WLS-fibers.

Сцинтилляционные детекторы широко применяются при проведении измерений в различных областях экспериментальной физики. Для повышения точности и информативности полученных данных применяют детекторы с объемом сцинтиллятора до нескольких дм^3 , в результате чего площадь светособирающей поверхности превышает площадь фотокатода фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Все это приводит к увеличению временного разрешения детектора за счет возрастания времени светосбора в сцинтилляторе.

Для устранения данной проблемы в крупно объемных детекторах применяют сцинтилляторы в форме усеченного конуса, различные фоконны, волоконные жгуты и др. На практике наиболее эффективным решением является использование спектросмещающих (WLS) световодов, которые способны поглощать излучение сцинтиллятора своей боковой поверхностью. Обеспечивая разделение сцинтилляционной и фотоэлектронной частей детектора, WLS-световоды должны обеспечивать достаточные концентрацию и эффективность передачи света на определенные расстояния.

В данной работе при расчетах применялись зеленые WLS-световоды, спектр поглощения которых хорошо согласуется со спектром свечения полистирольных сцинтилляторов, а спектр излучения – со спектральной чувствительностью ФЭУ типа СНФТ.

Одна из поверхностей сцинтиллятора использовалась в качестве собирающей, на которой вплотную друг к другу были размещены WLS-световоды (см. рисунок 1). Все волокна собирались в жгут, торец которого присоединялся к сильноточному ФЭУ.

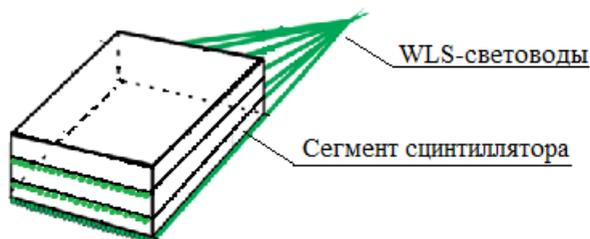


Рис. 1. Схематичное разделение сцинтиллятора на пластинчатые сегменты

Расчеты показали, что увеличение собирающей поверхности сцинтиллятора существенным образом улучшает эффективность и время светосбора. Сцинтиллятор, разделенный на продольные и поперечные фрагменты, показал прирост времени светосбора за счет многократного отражения фотонов и уменьшения площади собирающей поверхности. Разделение же детектора на сегменты в виде пластин показали уменьшение времени светосбора по сравнению с цельным.

Список литературы

1. Цирлин Ю.А. Светособирание в сцинтилляционных счетчиках. М: Атомиздат, 1975.
2. Olive K.A. et. al. «Particle detectors for non-accelerator physics». Chin. Phys. C, 38, 090001, 2014.
3. Mohanty P.K., Dugad S.R., Goswami U.D. et. al. «Measurement of some EAS properties using new scintillator detectors developed for the GRAPES-3 experiment». Astroparticle Physics, № 31, с. 32, 2009.
4. Mohanty P.K., Dugad S.R. и Gupta S.K. «Monte Carlo code G3sim for simulation of plastic scintillator detectors with wavelength shifter fiber readout». Rev. Sci. Instrum., № 83, 2012.

С.В. ГАВРИШ, Д.Н. КУГУШЕВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, Р.М.
УШАКОВ

ООО «НПП «Мелитта», МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

ИНДИКАТРИСА ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА УФ ИЗЛУЧЕНИЯ С U- ОБРАЗНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА

В работе на основе расчетно – экспериментальных исследований подтверждена связь оптической плотности импульсного ксенонового разряда и пространственного распределения излучения в УФ и ИК диапазонах оптического спектра. Показано влияние U- образной конфигурации плазменного канала на индикатрису излучения газоразрядной лампы.

S.V. GAVRISH, D.N. KUGUSHEV, D.Y. PUGACHEV,
R.M. USHAKOV

*Scientific and Production Enterprise "Melitta" Ltd, Bauman Moscow State
Technical University, Moscow, Russia*

RADIATION INDICATRIX OF A PULSE UV RADIATION SOURCE WITH A U-SHAPED CONFIGURATION OF THE PLASMA CHANNEL

In this work, on the basis of computational and experimental studies, the relationship between the optical density of a pulsed xenon discharge and the spatial distribution of radiation in the UV and IR ranges of the optical spectrum is confirmed. The influence of the U-shaped configuration of the plasma channel on the radiation indicatrix of a gas-discharge lamp is shown.

Импульсный ксеноновый разряд как источник УФ излучения широко применяется в оптико – электронных системах (ОЭС) обеззараживания воздуха и поверхностей. Равномерность энергетической облученности окружающих объектов, обеспечиваемая импульсной ксеноновой лампой, входящей в состав ОЭС, определяет эффективность работы системы в целом. Из работы [1] известно, что для достижения высокой мощности УФ излучения и приемлемой долговечности требуется высокая энергия разряда и увеличение длины межэлектродного расстояния, но для обеспечения компактности источника необходимо придание плазменному каналу U- образной конфигурации. Пространственное распределение силы света (индикатрисы) таких ламп подробно не изучено [1], а результатов исследований индикатрис в УФ и ИК диапазонах практически нет.

Диапазон вариаций индикатрис излучения существенно расширяется при изменении оптической толщины столба плазмы $k_{\lambda}d$ от нуля до бесконечности (k_{λ} – показатель поглощения плазмы газового разряда, d – диаметр разрядной трубки). В работе [2] нами были рассчитаны коэффициенты поглощения ксеноновой плазмы и показано, что в УФ-диапазоне разряд оптически прозрачен (рис. 1), в то время как в ближней ИК области k_{λ} может достигать величин 10^4 - 10^5 см⁻¹. Таким образом, можно ожидать, что в ИК-диапазоне спектра индикатриса будет уже, чем в УФ области.



Рис. 1. Коэффициент поглощения ксеноновой плазмы в УФ диапазоне.

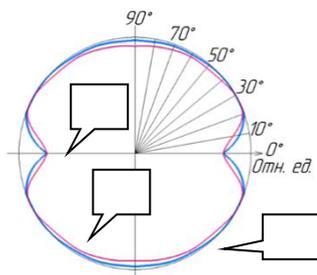


Рис. 2. Индикатриса излучения в УФ (1) и ИК (2) диапазонах

Для проверки сделанного предположения была сконструирована установка, позволяющая поворачивать вокруг своей оси вертикально расположенный плазменный канал непосредственно в процессе работы ксеноновой лампы U-образной конфигурации. Стационарно расположенные на расстоянии 1 м фотоприемники, обеспечивали регистрацию пиковой силы излучения в спектральных диапазонах 0,2 – 0,3 мкм и 2-5 мкм. Полученные результаты представлены на рисунке 2. Как и теоретически предполагалось, индикатриса излучения в ИК диапазоне (поз. 2 рисунок 2) размещена внутри индикатрисы УФ излучения (поз. 1 рисунок 2). Наблюдаемое на рисунке 2 снижение интенсивности излучения (точка А) обусловлено экранировкой распространения излучения в сторону фотоприемников одного горящего плазменного канала другим. Полученные данные представляют интерес для конструирования отражающей системы ОЭС с равномерным распределением интенсивности излучения изделия.

Список литературы

1. Импульсные источники света / И.С. Маршак, А.С. Дойников, В.П. Жильцов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.– 472 с.
2. Ультрафиолетовое излучение импульсно-периодических разрядов в инертных газах / В.М. Градов, С.В. Гавриш, С.С. Коробков, Д.Ю. Пугачев // Прикладная физика. – 2019. - №6. – С. 18 - 23.

С.В. ГАВРИШ, В.М. ГРАДОВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, С.В.
ПУЧНИНА

ООО «НПП «Мелитта», МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧКАХ ИМПУЛЬСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП

В работе на основе математической модели проведен анализ влияния коэффициента поглощения сапфира, электрической мощности разряда, интенсивности конвективного теплоотвода на мощность излучения оболочки, ограничивающей плазмообразующую среду. Приведены спектры излучения сапфировой оболочки при различных удельных электрических нагрузках.

S.V. GAVRISH, V.M. GRADOV, D.Y. PUGACHEV,
S.V. PUCHNINA

*Scientific and Production Enterprise "Melitta" Ltd, Bauman Moscow State
Technical University, Moscow, Russia*

MATHEMATICAL SIMULATION OF RADIATION PROCESSES IN SAPPHIRE ENVELOPES OF PULSE GAS DISCHARGE LAMPS

In this paper, on the basis of a mathematical model, an analysis was made of the influence of the absorption coefficient of sapphire, the electric power of the discharge, and the intensity of convective heat removal on the radiation power of the envelope that limits the plasma-forming medium. The emission spectra of the sapphire shell are given at various specific electrical loads.

Изучение физических процессов в сапфировых оболочках импульсных источников излучения является актуальной задачей, так как они определяют надежность и эксплуатационные характеристики газоразрядных ламп. В работе [1] авторами разработана математическая модель импульсного разряда, ограниченного системой излучающе - поглощающих оболочек. По предложенному расчетному алгоритму температура оболочек определяется балансом между поступающей энергией из плазмы и конвективно – радиационными потерями. Нагрев разрядной трубки осуществляется за счет теплопроводности плазмы, излучением разряда в области полупрозрачности сапфира, частично поглощаемым в объеме материала колб, и ИК излучением в области за длинноволновой границей пропускания сапфира. Конвективный теплоотвод играет важную роль в охлаждении оболочек. Так как основная доля излучения ксенонового или цезиевого разрядов

сосредоточена в области длин волн короче 2 мкм [1], то именно этот спектральный диапазон дает основной вклад в объемное поглощение в стенках. К тому же коэффициент поглощения сапфира k_c [2], имея минимальное значение при длинах волн около 2 мкм, нарастает в коротковолновую сторону и зависит от рабочей температуры колбы. В видимой области спектра при изменении температуры $T_{об.}$ от 700 до 2300К коэффициент меняется более чем на порядок [2], а рассчитанный нами максимум функции распределения Планка при изменении $T_{об.}$ от 1000К до 2300К смещается с 3 до 1,2 мкм (рис. 1). Появление второго экстремума обязано резкому нарастанию k_c в область больших длин волн.

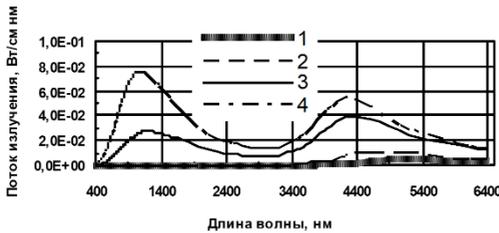


Рис. 1. Спектр излучения оболочек в момент погасания разряда для $P_{уд} = 155$ (1), 320 (2), 800 (3) и 1100 (4) Вт/см при коэффициенте теплоотдачи $0,001$ Вт/см²

Было установлено, что по мере увеличения электрической мощности температура оболочек растет, они начинают заметно излучать во все большей области спектра. При этом для очень больших электрических мощностей в области длин волн, начиная уже с 1 мкм, оболочки поглощают меньше, чем излучают. Из сказанного выше следует, что повышение электрической мощности источника при сохранении эксплуатационных характеристик возможно только при снятии тепловой нагрузки с оболочек, например, принудительным охлаждением. При низкой интенсивности охлаждения (малых коэффициентах теплоотдачи, например, $\alpha=0,001$ Вт/см² К) с увеличением электрической мощности растет вклад в энергетические потери оболочками лучистой составляющей. С увеличением коэффициента теплоотдачи ($\alpha=0,01$ Вт/см² К) заметно возрастает роль конвективного теплоотвода и ослабляется вклад сброса мощности излучением.

Список литературы

1. Gradov V.M., Gavrish S.V. Mathematical modeling of selective emitting nonequilibrium plasma in complex optical systems // Light & Engineering. – 1997. - Vol. 5, No. 3. - P. 16-19.
2. Лингарт Ю.К., Петров В.А., Тихонова Н.А. Оптические свойства лейкосапфира при высоких температурах. Область полупрозрачности//ТВТ. – 1982. – Т.20, №5. – С.872 – 880.

А.П. ДЕНИСЕНКО, Я.А. КОКОРЕВ, Р.Ф. ИБРАГИМОВ,
Е.В. РЯБЕВА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ НАБОРА АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Представлены результаты восстановления спектральных характеристик импульсного нейтронного генератора по показаниям активационных детекторов. Для восстановления применен метод максимальной энтропии, реализованный с помощью кода MAXED.

A.P. DENISENKO, Y.A. KOKOREV, R.F. IBRAGIMOV,
E.V. RYABEVA

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

FAST NEUTRON SPECTRAL CHARACTERISTICS UNFOLDING WITH USING ACTIVATION DETECTORS

The results of unfolding spectral characteristics of a pulsed neutron generator from the readings of activation detectors are presented. Unfolding is based on the method of maximum entropy, implemented using the MAXED code.

При работе с нейтронными источниками важно знать характеристики создаваемого ими нейтронного поля, в частности, энергетический спектр нейтронов. Одним из методов определения нейтронного спектра является активационный метод, основанный на измерении наведенной активности в образце в результате облучения нейтронами [1].

Восстановление спектра сводится к решению системы интегральных уравнений Фредгольма первого рода [2]. Для этого существуют специальные методы, например, метод наименьших квадратов, метод максимальной энтропии (ММЭ), методы регуляризации, нейронные сети и другие.

В данной работе рассмотрена возможность применения ММЭ для восстановления нейтронного спектра по показаниям активационных детекторов. В качестве источника нейтронов использовался импульсный нейтронный генератор ИНГ-07Т с энергий нейтронов 14 МэВ. Набор активационных детекторов включал пластины из ванадия,

алюминия, индия и меди (таблица 1). Активность измерялась на гамма-спектрометре из особо чистого германия (ОЧГ). Основной вклад в погрешность значения активности вносит неточность измеренного числа импульсов в спектре вторичного гамма-излучения.

Таблица 1 – Характеристики активационных детекторов

Детектор	Реакция	Энергия порога, МэВ	Активность насыщения, Бк
V	$^{51}\text{V}(n,p)^{51}\text{Ti}$	1,7	$(4,52 \pm 0,09) \cdot 10^3$
Al	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	1,9	$(1,49 \pm 0,03) \cdot 10^4$
In	$^{113}\text{In}(n,2n)^{112}\text{In}$	9,5	$(6,3 \pm 0,7) \cdot 10^3$
Cu	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	11,2	$(1,07 \pm 0,01) \cdot 10^5$

Для восстановления спектра с помощью ММЭ использовался код MAXED [3], а именно его модификация для малоканальных детекторов (few-channel unfolding). Восстановленный спектр представлен на рисунке 1. Энергетический диапазон разбит по порогам реакций и одинаков для всех трех спектров.

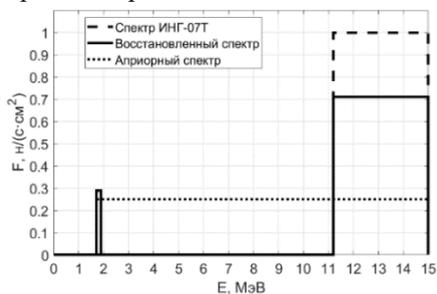


Рисунок 1 – Результат восстановления спектра ИНГ-07Т

Из результата видно, что основная часть нейтронов лежит в области выше 11,2 МэВ. Для более точного восстановления желателен набор с большим числом активационных детекторов и пороговых реакций.

Список литературы

1. Р.Ф. Ибрагимов, Я.А. Кокорев, А.П. Денисенко. / Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – №2. – С. 156-167.
2. Matzke M. /Radiation Protection Dosimetry. – 2003. – Т. 107. – №. 1-3. – Р. 149-168.
3. Reginatto M., Goldhagen P. MAXED, a computer code for the deconvolution of multisphere neutron spectrometer data using the maximum entropy method. – Dept. of Energy, 1998. EML-595.

А.Б. ЗАКИРОВ, В.М. САБЛИН
АО «НПП «Торий», Москва, Россия

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ КЛИСТРОНА С ЦЕЛЮ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ ГОТОВНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

В работе рассмотрены особенности работы электронной пушки многолучевого клистрона. Приведены способы уменьшения времени готовности электронной пушки, результаты тепловых расчетов ее разных конструкций, а также экспериментальные результаты измерения времени готовности электронной пушки и изделия в целом.

A.B. ZAKIROV, V.M. SABLIN
JSC "RPE "Toriy", Moscow, Russia

MODERNIZATION OF THE KLYSTRON ELECTRON GUN WITH THE PURPOSE TO REDUCE THE DEVICE READINESS TIME

The features of the operation of a multi-beam klystron electron gun are considered in this paper. Methods for reducing the readiness time of an electron gun, the results of thermal calculations of its various designs, as well as experimental results of measuring the readiness time of an electron gun and the whole device are presented.

В настоящее время уменьшение времени готовности изделия остается одной из актуальных задач в процессе его разработки или модернизации. В особенности это касается приборов военного назначения. Как правило, время готовности изделия определяется временем достижения на катоде температуры, которой достаточно для получения заданного уровня выходной мощности. Однако в процессе прогрева катодно-подогревательного узла мощность, подводимая к подогревателю, расходуется на прогрев и других деталей электронной пушки из-за потерь на теплопроводность и излучение. Высокая теплоемкость этих деталей (по сравнению с катодом) приводит к значительно большему времени их нагрева, что, в свою очередь, является причиной продолжительных смещений электродов пушки вследствие тепловых деформаций, что приводит к «затягиванию» получения необходимого уровня тока катода.

В данной работе рассмотрена электронная пушка многолучевого клистрона непрерывного действия (рис. 1). На рис. 2 показаны результаты теплового расчета электронной пушки, а также

экспериментальных измерений времени готовности изделия до изменений и после.

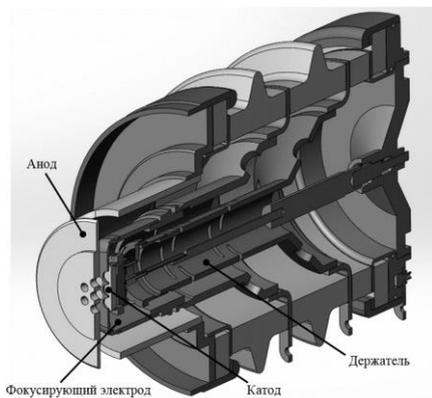


Рис. 1. Базовая конструкция электронной пушки

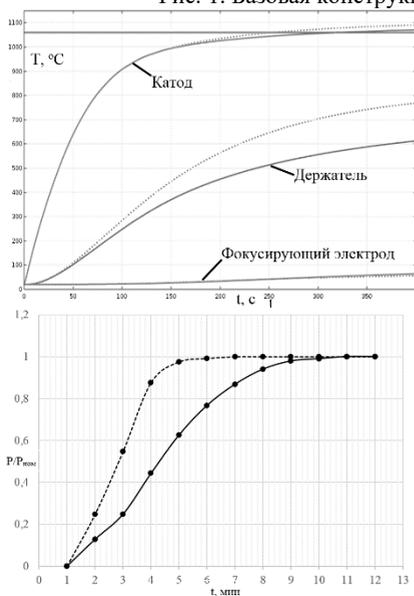


Рис. 2. Слева: результаты тепловых расчетов электронной пушки с базовой конструкцией (сплошные линии) и с модернизированной конструкцией (штриховые линии), справа: экспериментально измеренное время готовности до и после модернизации

Результаты испытаний показывают, что необходимый уровень мощности (в данном случае 0,8 от номинальной мощности) с новой

конструкции достигается за 3,8 минут, в то время как старая конструкция обеспечивала эту мощность только через 6,2 минуты. Таким образом, изменение конструкции пушки позволило увеличить скорость ее прогрева и значительно снизить время установления межэлектродных расстояний пушки, необходимых для получения заданных значений тока катода.

Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.Э. ЛУПАРЬ, И.Д. КОЛБИН

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРОННО-РАДИАЦИОННОГО МЕТОДА

В работе изучаются возможности применения варианта метода наименьших квадратов для получения информации об элементном составе смеси горных пород. Получен ряд экспериментальных откликов детекторов на базе $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и BGO на гамма-излучение неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов, образующееся при воздействии нейтронов радиоизотопного источника на различные распространенные оксиды. Также получены модельные отклики с использованием инструментов Geant4. Показана возможность применения алгоритма на базе метода наименьших квадратов для проведения процедуры разложения спектра отклика от смеси веществ на базовые составляющие (на спектры откликов чистых компонент).

R.F. IBRAGIMOV, E.E. LUPAR, I.D. KOLBIN

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

ELEMENTAL ANALYSIS OF MINERALS COMPOSITION USING THE NEUTRON-RADIATION METHOD

The possibility least squares method to obtain information on the elemental composition of a minerals mixture is investigated in this work. A few experimental detector responses from $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ and BGO scintillators to gamma radiation from neutron inelastic scattering and radiative capture at such materials as iron, silicon and titanium oxides, as well as calcium hydroxide, have been obtained. Model responses were also obtained using Geant4 instruments. The possibility of using the algorithm based on the least squares method for carrying out the procedure for decomposing the response spectrum from a mixture of substances into basic components (into response spectra of pure components) is shown.

В настоящее время продолжают совершенствоваться способы решения задачи потокового элементного анализа горных пород и руд с помощью неразрушающих ядерно-физических методов. Современные вычислительные средства, системы физико-математического моделирования, а также предварительные лабораторные исследования позволяют повысить точность методов анализа.

В работе представлены результаты проведения экспериментов по получению откликов детекторов на базе $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и BGO на гамма-излучение неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов,

образующееся при воздействии нейтронов радиоизотопного источника на такие материалы как оксиды железа, кремния и титана, а также на гидроксид кальция. Также получены модельные отклики с использованием инструментов Geant4. На рисунке 1 показана фотография эксперимента и визуализация модели.

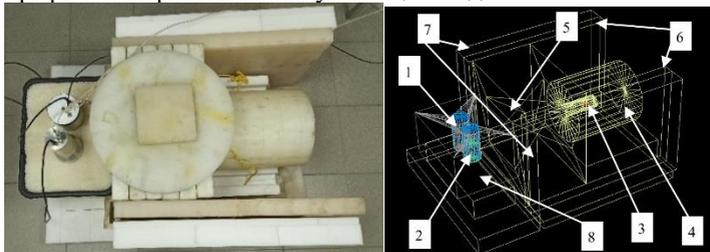


Рис. 1. Фотография эксперимента и визуализация модели Geant4 по получению спектров от различных химических соединений с помощью радиоизотопного источника. 1 – детектор $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ в алюминиевом корпусе, 2 – детектор BGO в алюминиевом корпусе, 3 – источник нейтронов, 4 – полиэтиленовый переносной контейнер источника, 5 – емкость для расположения образцов, 6 – стенки из полиэтилена, 7 – стенки из борированного полиэтилена, 8 – ящик с гранулированным полиэтиленом

Помимо модели данного эксперимента также были получены расчетные спектры откликов отдельно для гамма-излучения неупругого рассеяния (ГИНР) и гамма-излучения радиационного захвата (ГИРЗ) при воздействии потока быстрых нейтронов на смесь оксидов с различным процентным содержанием компонент.

Разработан алгоритм оценки вклада в общий отклик от каждого отдельного компонента смеси. Принцип процедуры оценки вкладов в целом описан в работе [1] и заключается в подборе таких значений весовых коэффициентов к эталонным спектрам, при которых сумма этих эталонных спектров, умноженных на эти коэффициенты, будет минимально отличаться от спектра исследуемого образца. Проверка алгоритма проводилась на модельных и экспериментальных спектрах. Для смеси из Fe_2O_3 и TiO_2 в соотношении 5 на 5 кг, обработка экспериментального отклика показала результат в виде соотношения процентного содержания веществ Fe_2O_3 к TiO_2 как 50.5% к 49.5%.

Список литературы

1. Iskender A.R. Alborz E. and others// Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.A. 2017. V.843, P. 29–33.

А.С. ИППОЛИТОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАТОДНО-СЕТОЧНЫХ УЗЛОВ В ИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОННЫХ ТРУБОК С ОКСИДНЫМИ КАТОДАМИ

В работе приводятся результаты расчетного моделирования условий работы катодно-сеточных узлов газонаполненных нейтронных трубок с накаливаемыми оксидными катодами в стационарном тепловом режиме. Анализ тепловых режимов ионного источника нейтронной трубки проведен с учетом влияния теплопередачи, излучения и осаждения заряженных частиц от термоэлектронного катода на систему управляющих электродов.

A.S. IPPOLITOV, S.P. MASLENNIKOV

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

STUDY OF THERMAL OPERATION MODES OF CATHODE-GRID UNITS IN NEUTRON TUBE ION SOURCES WITH OXIDE CATHODES

The paper presents the results of computational modeling of the operating conditions of the cathode-grid units of gas-filled neutron tubes with oxide cathodes in a stationary thermal regime. The analysis of the thermal regimes of the ion source of the neutron tube was carried out taking into account the influence of heat transfer, radiation and deposition of charged particles from the hot cathode on the system of control electrodes.

Обеспечение заданного теплового режима работы различных элементов малогабаритных нейтронных трубок, составляющих основу импульсных нейтронных генераторов, представляет собой важную и актуальную задачу для обеспечения устойчивой работы геофизической аппаратуры при проведении исследований скважин, в частности, в условиях повышенной температуры окружающей среды [1, 2].

Для проведения расчетного анализа тепловых условий работы элементов импульсного нейтронного генератора были использованы геометрические твердотельные 3D-модели нейтронных трубок (рис.1), в ионных источниках которых устанавливались модели оксидных катодов различных типов [3]. В расчетных моделях учитывалось наличие внешней защиты нейтронных трубок (при их размещении в конструктиве аппаратуры нейтронного каротажа) от воздействия

внешних факторов окружающей среды. Защита представлялась в виде металлических корпусов, внутри которых располагался изоляционный материал. Следует отметить, что наличие дополнительных корпусов и слоев изоляционного материала, охватывающих нейтронную трубку, может являться причиной перегрева при работе аппаратуры в случае недостаточного теплоотвода.

Катодно-подогревательные узлы (КПУ) в 3D-модели создавались из никелевого корпуса со стальной спиралью внутри. Нагрев эмитирующей поверхности оксидных катодов осуществлялся путем подачи мощности (теплового потока) на спираль катодно-подогревательного узла.

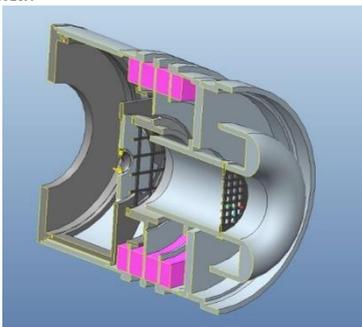


Рис.1. Структура модули катодно-сеточного узла

В расчетном программном комплексе были заданы условия, при которых энергия передавалась от КПУ к сеточному электроду в виде теплового излучения и через теплопередачу. Расчет проводился для установившегося теплового режима.

По результатам проведенных расчетов были определены условия, при которых элементы и детали нейтронных трубок в штатном режиме их эксплуатации не нагреваются до температур, выходящих за пределы допустимых диапазонов.

Список литературы

1. Мамедов Н.В., Масленников С.П. и др. // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 9. С. 1367-1374.
2. Рачков Р.С., Масленников С.П., Юрков Д.И. // Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 1. С. 39-43
3. Киселев А.Б. Металлооксидные катоды электронных приборов/ М.: МФТИ, 2002. 240 с.

И.А. КАНЬШИН

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

ТРАЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ КОРПУСКУЛЯРНОГО ПОТОКА, ЭКСТРАГИРУЕМОГО ИЗ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ

В работе представлен способ траекторного анализа корпускулярных потоков в ускоряющей системе нейтронной трубки, базирующийся на численном моделировании их динамики. В качестве исходных данных моделирования используется эмиттанс ионного пучка, зависимость которого от геометрических параметров ускоряющей системы экспериментально исследуется в процессе факторного анализа и выражается соответствующей функцией параметров ускоряющей системы. При таком подходе в последующем имеется возможность вычислять эмиттанс пучка и выполнять моделирование его динамики без проведения физического эксперимента.

I.A. KANSHIN

Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

TRAJECTORY ANALYSIS OF THE CORPUSCULAR FLOW EXTRACTED FROM NEUTRON TUBE PLASMA SOURCE

The paper presents a method for trajectory analysis of corpuscular flows in the neutron tube accelerating system, based on a numerical simulation of their dynamics. As the initial modeling data, the ion beam emittance is used, the dependence of which on the geometric parameters of the accelerating system is experimentally studied in the process of factor analysis and is expressed by the corresponding function the accelerating system parameters. With this approach, it is subsequently possible to calculate the emittance of the beam and to simulate its dynamics without conducting a physical experiment

При разработке каротажных малогабаритных нейтронных трубок (НТ), конструкция которых включает Пеннинговский источник ионов (ПИИ) и ускоряющую систему (УС) [1], уделяется особое внимание электропрочности прибора. Ее снижение связано, в частности, с запылением внутренней поверхности высоковольтного изолятора УС продуктами взаимодействия пучка ионов с ее электродами. В этом случае на ней образуется проводящий слой, способствующий пробоем по внутренней поверхности изолятора, деградации вакуумной оболочки и выходу прибора из строя. Для предотвращения последствий перечисленных выше процессов на этапе разработки УС проводится траекторный анализ корпускулярных потоков, который, как правило, основывается на результатах численного моделирования. При этом используют несколько подходов. Один из них - «сквозное»

моделирование работы изделия, включающее сначала анализ процессов плазмообразования в плазменном источнике, а затем экстракцию из него пучка ионов. Другой – моделирование динамики пучка без учета влияния плазменного источника, когда в качестве эмиттирующей ионы поверхности выступает поверхность проникающей в УС из ПИИ плазмы – мениск.

В настоящей работе представлен иной метод траекторного анализа, отличающийся тем, что в качестве исходных данных моделирования используется эмиттанс пучка на выходе из ПИИ. Таким образом, ПИИ как функциональный узел НТ при моделировании физически не рассматривается, но его влияние на параметры корпускулярного потока в УС учитывается в эмиттансе. Для вычисления эмиттанса как стартового параметра моделирования динамики корпускулярных потоков экспериментально определяется его совокупная зависимость от геометрических параметров УС посредством проведения факторного анализа. Это впоследствии дает возможность вычислять эмиттанс пучка и моделировать его динамику без проведения физического эксперимента.

На рис. 1а представлено фотографическое изображение светящегося в УС следа экстрагируемого из ПИИ ионного пучка, а на рис. 1б результат моделирования в COMSOL Multiphysics траекторий ионного пучка в УС с учетом вычисленного эмиттанса на выходе из ПИИ. Сравнение рисунков позволяет заключить о согласии результатов моделирования траекторий пучка в УС с результатами, полученными в физическом эксперименте.

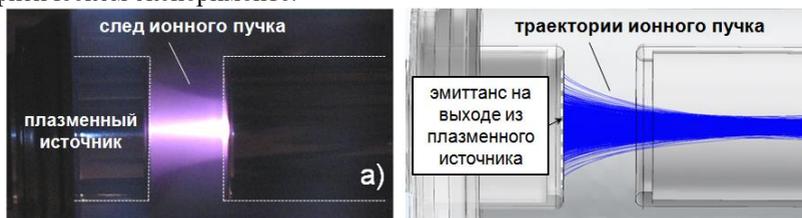


Рис. 1. Светящийся в УС след экстрагируемого из ПИИ ионного пучка (а) и его смоделированные траектории с учетом вычисленного эмиттанса на выходе из ПИИ (б)

Список литературы

1. Рачков Р.С., Пресняков А.Ю., Юрков Д.И. “Исследование влияния магнитного поля скважины на нейтронную трубку геофизической аппаратуры” // Атомная энергия, Т. 126, вып. 6, С. 334-337, 2019.

И.М. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИОННОГО ИСТОЧНИКА ПЕННИНГА НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований амплитудно-временных характеристик ионных источников Пеннинга при использовании магнитных систем с различным распределением магнитных полей, которые формируются в разрядной ячейке.

I.M. MAMEDOV, S.P. MASLENNIKOV

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

INFLUENCE OF PERMANENT MAGNET PARAMETERS ON OPERATING REGIMES OF PENNING ION SOURCE OF NEUTRON TUBE

The paper presents the results of experimental studies of the amplitude-time characteristics of Penning ion sources using magnetic systems with different distribution of magnetic fields that are formed in a discharge cell.

Ионные источники Пеннинга с «холодными» катодами используются в выпускаемых во ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л.Духова газонаполненных нейтронных трубках, входящих в состав импульсных нейтронных генераторов, применяемых в различных областях [1, 2].

Подробному изучению различных мод и режимов горения разряда Пеннинга посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ, проведенных в научно-исследовательских лабораториях по всему миру. Исследования выполнены с разрядными ячейками, имеющими различные геометрические параметры и режимы питания как постоянного, так импульсного тока. В опубликованных до настоящего времени материалах практически отсутствует информация по влиянию на работу ионных источников параметров постоянных магнитов, изготавливаемых по разным техническим требованиям и из различных магнитных материалов.

В результате проведенных исследований были получены данные о характере влияния параметров кольцевых магнитов на работу ионных источников. В работе приводятся результаты исследований влияния азимутальных и радиальных составляющих поля на амплитудно-

временные характеристики разряда Пеннинга. На основе полученных данных были выработаны технические требования на кольцевые магниты предназначенные для использования в магнитных сборках портативных нейтронных генераторов.

Проведенные исследования позволили выявить различные режимы горения разряда Пеннинга в зависимости от давления, геометрических параметров разрядной ячейки, напряжения на аноде и значения магнитного поля внутри ячейки [2, 3]. На рисунке 1 показана структура ионного источника нейтронной трубки, в котором магнитная сборка составлена из пяти магнитных колец.

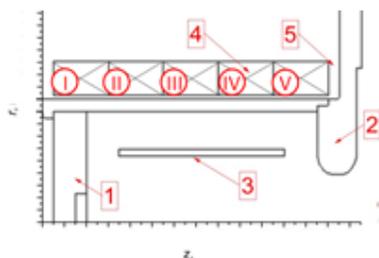


Рис. 1 Структура ИИИ ГНТ: 1 – катод, 2 – антикатод, 3 – анод, 4 – магнитная сборка, 5 – алюминиевая проставка

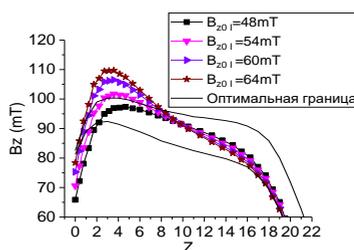


Рис. 2 Распределение магнитного поля внутри ИИИ ГНТ в зависимости от параметров магнитов

Моделирование распределений магнитных полей, формируемых в ионных источниках Пеннинга, проведено в программе Comsol Multiphysics. На рисунке 2 представлены результаты расчета аксиальной составляющей индукции магнитного поля (B_z) для варианта магнитной сборки, в которой четыре магнита (II - V) имеют одинаковые параметры (индукция в центре кольца $B_{z0} = 54$ мТл), а у самого ближнего к катоду магниту (I) изменяется индукция в центре магнита в диапазоне от 48 до 64 мТл. Сплошными линиями обозначена область наиболее предпочтительного распределения магнитного поля в разрядной ячейке. Представленные данные наглядно показывают, что, изменяя параметры размещенного около катода магнита, можно в широких пределах регулировать форму распределения поля внутри источника и привести ее к наилучшим параметрам.

Список литературы

1. Vladivoj Valkovic / 14 MeV Neutrons. Physics and Applications. CRC Press Taylor&Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2016, 500 p.
2. Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П. и др. Каротажник, 2006, № 10—11, с. 175—187.
3. Юрков Д.И., Боголюбов Е.П., Миллер В.В. и др. Каротажник, 2013, № 9, с. 77—88,

И.С. МАСЛЕННИКОВА, Г.И. ЗЕБРЕВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ИСПЫТАНИЯ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Представлены результаты испытаний различных видов цифро-аналоговых микросхем на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц космического пространства. Выполнена оценка пороговых значений линейной передачи энергии возникновения одиночных радиационных эффектов.

I.S. MASLENNIKOVA, G.I. ZEBREV, S.P. MASLENNIKOV
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

INVESTIGATIONS OF SINGLE EFFECTS IN DIGITAL-ANALOG MICROCHIPS

This article presents the results of stability tests types of frequency synthesizers to the exposure to heavy ions of space. The level of this type of threshold value linear energy transfer the occurrence of single event effects.

Устойчивость интегральных микросхем к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства (КП) является одной из главных проблем, которую пытаются решить разработчики космической электронной аппаратуры. После проектирования и производства новых электронных компонентов для космических применений должен быть проведен комплекс испытаний на все виды одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) в диапазоне рабочих температур и различных электрических режимах работы компонентов.

Испытания проводились в режимах применения микросхем в аппаратуре при максимальных температурах и электрических параметрах. Значения линейной передачи энергии (ЛПЭ) выбиралась исходя из требований к сроку активного существования, орбиты, или задается в технических требованиях на аппаратуру. Электронные компоненты, которые не прошли испытания с положительным результатом, должны быть заменены. Если замена невозможна, необходимо применить дополнительные методы обеспечения их стойкости. Наиболее критичными являются тиристорные эффекты и связанные с ними катастрофические отказы, пробой подзатворного

диэлектрика и эффекты выгорания в ЭКБ с высоким напряжением питания.

Испытания электронных компонентов на тяжелых ионах проводились на испытательных установках, расположенных в г. Дубна (Московская область, Россия). Установки, используемые в ходе этих испытательных кампаний, позволяют облучать микросхемы ионами с широким диапазоном энергий от 3 МэВ/нуклон до 23 МэВ/нуклон и диапазоном потоков частиц от 10 до 10^5 частиц \times см $^{-2}\times$ с $^{-1}$. Образцы облучали различными ионами, имеющими энергии от 6,34 до 69,2 МэВ \times см 2 /мг при температуре 25 °С (как было указано в требованиях). Приборы облучались при нормальном падении потока с неравномерностью менее 10 %. Критерием, определяющим возникновение эффекта SEL, было скачкообразное увеличение тока потребления вместе с отрицательным результатом функционального и параметрического тестирования, поскольку значение тока и функционирование восстанавливались только после сброса питания. Катастрофический отказ регистрировался в случае отрицательного результата функционального тестирования после пересброса питания. Для каждого типоминимала микросхем количество испытываемых образцов составляло не менее трех.

В ходе работы были проведены испытания нескольких типоминималов микросхем различных производителей. Были рассчитаны верхние и нижние границы для эффектов, которые проявлялись при облучении микросхем.

Полученные результаты испытаний позволяют разработчикам РЭА сделать вывод о соответствии испытанных устройств заданным требованиям и возможности их применения. Если результаты испытаний не удовлетворяют заданным условиям, разработчики усовершенствуют компоненты для лучшей стойкости к радиационным эффектам.

Список литературы

1. Maksimenko, T.A.. et al. Single Event Effect Test Results for Candidate Spacecraft Electronics, 2019 IEEE Radiation Effects Data Workshop, July 2019.
2. Зебрев Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. 2010. с. 148.

Д.А. МЯНДИН¹, Е.В. РЯБЕВА²,
И.В. УРУПА², Р.Ф. ИБРАГИМОВ²

¹ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Рассмотрен метод восстановления энергетического распределения потока нейтронов с использованием искусственной нейронной сети (ИНС) на основании модельных данных сцинтиллятора EJ-276. Предложена оптимальная архитектура ИНС.

D.A. MYANDIN¹, E.V. RYABEVA²,
I.V. URUPA², R.F. IBRAGIMOV²

¹Federal State Unitary Enterprise VNIIA, (Dukhov Automatics Research
Institute), Moscow, Russia

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

NEUTRON SPECTRUM UNFOLDING METHOD USING ARTIFICIAL NEURON NETWORK

Neutron spectrum unfolding method using artificial neuron network (ANN) based on modeled data of plastic scintillator EJ-276 are considered. The optimal parameters of ANN's architecture are proposed.

Нейронные сети нашли широкое применение в решениях задачи по восстановлению нейтронного спектра [1-3].

Основная сложность при восстановлении энергетического распределения потока нейтронов возникает из-за наличия погрешности в аппаратном спектре, возникающей ввиду энергетической нелинейности спектра протонов отдачи, а также ненулевого энергетического разрешения спектрометра. Кроме того, система уравнений (1), как правило, является переопределенной, что тоже вносит вклад в погрешность восстановления.

$$N_j = \sum_{i=1}^m A_{ij} F_i, \quad (1)$$

где N_j - отклик j -го канала детектора, A_{ij} - расчетный отклик j -го канала детектора на нейтроны i -ой энергетической группы, F_i - искомый нейтронный спектр, n - число каналов спектрометра, m - число энергетических групп.

Исходными данными для задачи восстановления является матрица, представляющая собой смоделированный набор откликов сцинтилляционного детектора EJ-276 на моноэнергетические линии нейтронного излучения от 1 до 14 МэВ (рис.1).

На рис.2 приведен результат восстановления экспериментального спектра нейтронов от нейтронного генератора на основе реакции D-T. Поток нейтронов – $9,81 \cdot 10^8$ н/с; ускоряющее напряжение на трубке – 130 кВ; расстояние от источника до детектора 170 см; угол между осью генератора и детектором 90° . Расчетная теоретическая энергия нейтронов определяется по формуле:

$$E = \frac{m_d m_n T}{(m_n + m_{He4})^2} \cdot \left(\cos \theta_n + \sqrt{\cos^2 \theta_n + \frac{(m_n + m_{He4})[(m_{He4} - m_d)T + m_{He4}Q]}{m_d m_n T}} \right)^2,$$

где m_d , m_n , m_{He4} – массы дейтрона, нейтрона и альфа-частицы соответственно, кг; T – кинетическая энергия налетающей частицы, МэВ; θ_n – угол вылета нейтрона из мишени; Q – суммарная энергия D-T реакции, МэВ. Расчетное значение энергии нейтронов составляет 13,87 МэВ, что соответствует результатам восстановления $E = 13,90 \pm 0,03$ МэВ.

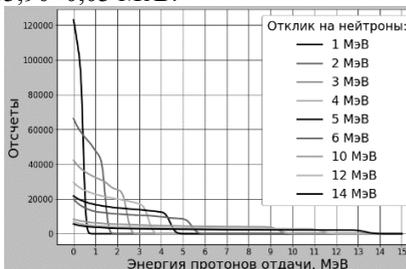


Рис.1. Отклики детектора на моноэнергетические нейтроны



Рис.2. Восстановленный спектр нейтронов от генератора нейтронов

Список литературы

1. Palacios, F., Hernández-Dávila, V. M., Méndez I, R., Iniguez, M.P., Barquero, R., Manzanares-Acuña, E., Vega-Carrillo, H.R., Neutron Dosimetry and Neutron Spectrum Unfolding Using Neural Networks, Radiation Protection Dosimetry (2004).
2. Jie Y. Rong L. Cheng L. et al. Application of artificial neural networks for unfolding neutron spectra by using a scintillation detector. Science China. Physics, Mechanics and Astronomy March (2011) Vol. 54 No.3: 465-469.
3. Ortiz-Rodriguez J. M. Martinez-Blanco M.R. Vega-Carrillo H. R. et al. Neutron spectrometry using artificial neural networks for a bonner sphere spectrometer with a 3He detector. Revista Mexicana de Fisica S 57 (1) 69-71 (2011).

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*

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТРОСКОПОВ С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СМЕШАННОГО БЫСТРОГО НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Современное развитие цифровых электронных систем позволяет исследовать возможность построения интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников смешанного быстрого нейтронного и гамма-излучения, в том числе и импульсного. В таком интроскопе используются координатно-чувствительные детекторы (КЧД) модульного типа, т.е. когда КЧД является матрицей отдельных детекторов (модулей). Регистрация импульсов этих детекторов и их цифровая обработка производится одновременно, параллельно и независимо друг от друга. Это также позволяет проводить цифровую идентификацию нейтронов и гамма-квантов.

M. V. PROKURONOV, V. D. SEVASTYANOV, O. I. FOMIN,
R. M. SHIBAEV, A. V. YANUSHEVICH.

*FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and
Radio-Engineering Measurements*

PRINCIPLES OF CONSTRUCTING INTROSCOPES WITH CODED APERTURE FOR REGISTRATION OF IMAGE OF SOURCES OF MIXED FAST NEUTRON AND GAMMA RADIATION

The modern development of digital electronic systems makes it possible to study the possibility of constructing introsopes with a coded aperture for recording images of sources of mixed fast neutron and gamma radiation, including pulsed ones. Such an introscope uses modular-type coordinate-sensitive detectors (CSD), i.e. when the CSH is a matrix of individual detectors (modules). The registration of the impulses of these detectors and their digital processing are carried out simultaneously, in parallel and independently of each other. This makes it possible to carry out digital identification of neutrons and gamma quanta.

Интроскоп с кодированной апертурой измеряет угловое направление регистрируемого гамма-кванта, нейтрона, а также спектрально-временные характеристики поля излучения. А это наиболее полная информация о поле ионизирующего излучения, и

измерение этих характеристик важно при исследованиях в ядерной физике, ядерных энергетике и медицине.

Современное развитие цифровых электронных систем: АЦП, ПЛИС, систем ввода-вывода информации, а также развитие методов решения обратных некорректных задач по устранению искажений в восстановленном изображении позволяет исследовать возможность расширения области применения интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников смешанного нейтронного и гамма-излучения. Такой интроскоп состоит из коллиматора с кодированной апертурой, защиты от фонового излучения и координатно-чувствительного детектора (КЧД) модульного типа. Регистрация импульсов модульных детекторов и их цифровая обработка производится одновременно, параллельно и независимо друг от друга. В коллиматоре имеются отверстия, определенным образом расположенные, каждое из которых строит изображение на поверхности КЧД, подобно камере обскуре, формируя теневое изображение. По массиву токов разрешающих элементов КЧД изображение источников декодируется и восстанавливается. Для раздельной регистрации нейтронного и γ -изображений в таком интроскопе могут использоваться сцинтилляционные детекторы с цифровой идентификацией частиц по форме импульса и черенковские детекторы. Интроскопы могут обладать высоким временным разрешением (до 1нс) и позволяют регистрировать изображение импульсных процессов. В КЧД наблюдаются искажения теневого изображения при краевых эффектах взаимодействия излучения с коллиматором и модулями КЧД и при многократном рассеянии нейтронов и γ -квантов в разных модулях КЧД. Искажения можно уменьшить, если применять КЧД, в которых происходят процессы поглощения излучения. Для тепловых и быстрых нейтронов, это процессы с образованием альфа-частиц. Для регистрации изображения источников тепловых нейтронов используется интроскоп с кодированной апертурой. Быстрые нейтроны могут поглощаться в реакциях с образованием альфа-частиц в алмазных детекторах, они применяются в экспериментах по термоядерному синтезу. На основе алмазных КЧД можно исследовать возможность построения интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения нейтронных источников с высокой плотностью потока быстрых нейтронов. Активно используются и развиваются математические методы по устранению искажений в восстановленном изображении.

С.А. РАДЖАПОВ, Ф.Г.МУЛЛАГАЛИЕВА. Б.С. РАДЖАПОВ,
М.А.ЗУФАРОВ

*Физико-технический институт НПО "Физика-Солнце" АН РУз, Узбекистан,
100084, Ташкент, ул. Чингиза Айтматова 2Б*

РАЗРАБОТКА РАДИОМЕТРА АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЯ

В статье приводится описание разработанного радиометра для экспрессного измерения альфа излучения радиоактивных элементов на базе кремниевого детектора большого диаметра. Разработанный радиометр предназначен для измерения альфа-излучений естественных изотопов. (^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Bi и т.д.) в различных средах.

S.A. RADZHAPOV, F.G. MULLAGALIEVA, B.S.
RADZHAPOV, M.A. ZUFAROV

*Physical-technical institute of scientific production association "Physics-Sun"
Tashkent, 100084, Chingiz Aytmatov Str., 2B, Uzbekistan*

THE DEVELOPMENT OF THE RADIOMETER FOR THE MEASUREMENT OF ALPHA RADIATION

The article describes the developed radiometer for express measurement of alpha radiation of radioactive elements based on a large-diameter silicon detector. The developed radiometer is designed to measure alpha radiation from natural isotopes. (^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Bi , etc.) in various environments.

[1] Создание специализированных приборов для контроля облучения при работе с радиоактивными изотопами - одна из актуальных задач спектроскопии ядерного излучения. Требуются компактные и точные приборы, работающие как в счётном, так и спектрометрическом режимах.

[2] Детекторы с большой чувствительной областью из кремния диаметром больше 50 мм в мировой практике используются очень мало из за сложной технологии их изготовления. Использование таких детекторов большого диаметра позволяет изготовить радиометр (устройство), измеряющий заряженные частицы непосредственно в самой ячейке.

Разработка и оптимизация технологии изготовления, численные расчеты и компьютерное математическое моделирование кремниевых детекторов больших размеров приведена в работе [1].

Структурная схема радиометра приведена на рисунке 1. В его состав входят следующие функциональные элементы: 1 - узел

воздухозаборника, 2 – рабочая камера с детектором [2], 3 - узел усиления и селекции информации (аналоговый узел), 4 - микроконтроллерный узел (цифровой узел), 5 - персональный компьютер с установленным программным обеспечением, 6 - узел вторичного электропитания, 7 - GSM/SMS-модуль, для проведения измерений в онлайн режиме.

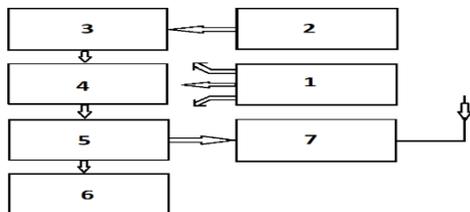


Рис.1. Блок схема радиометра.

Рабочая камера представляет собой пустотелый цилиндр, внутри которого в геометрическом центре на подвесках укреплен детектор кремниевый детектор с диаметром чувствительной области 60 мм, который чувствителен к регистрации альфа-частиц с двух сторон. Информация, регистрируемая детектором, передаётся на персональный компьютер, осуществляющий обработку измерений.

Узел усиления и селекции обеспечивает преобразование заряда, возникшего в объёме детектора от взаимодействия с регистрируемой α -частицей, в импульс напряжения и затем его усиление.

Микроконтроллерный узел обеспечивает полную автономную работу устройства регистрации. Питание всего устройства обеспечивается от встроенной батареи.

Для осуществления операции нагнетания и последующего обновления анализируемого воздуха, в качестве воздухозаборника был выбран вариант с использованием поршневой малогабаритной помпы. Информация с ПЭВМ передается в приемный центр с помощью радиоканала через GSM-модули.

В результате исследования и проведения технологических работ была разработана схема изготовления радиометра, его электронная часть.

Список литературы

1. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Рахимов Р.Х. // Computational Nanotechnology. 2018. № 1. С. 151.
2. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Лутпуллаев С.Л., Пиндюрин Ю.С., Хусамидинов С.С., Юткин С.В. Патент РУз №IAP 04882.

М.Н. САВЕЛЬЕВ, С.В. КОЛЕСНИКОВ, Н.В. БОЙКО, С.Г.
РУДАКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ МНОГОМОДУЛЬНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Разработана трехмерная модель рамы многослойного сцинтилляционного детектора нейтронов (МСДН), учитывающая весовую нагрузку от модулей регистрирующей аппаратуры и слоев замедлителя. Произведен расчет напряженно-деформированного состояния рамы детектора МСДН в среде конечно-элементного анализа. Трехмерное моделирование и выпуск чертежей осуществлен в программе Creo Parametric.

M.N. SAVELEV, S.V. KOLESNIKOV, N.V. BOYKO,
S.G. RUDAKOV

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

CALCULATION OF THE MAIN DESIGN PARAMETERS OF A MULTIMODULE SCINTILLATION NEUTRON DETECTOR

A three-dimensional model of the frame of a multilayer scintillation neutron detector (MSDN) was developed, considering the weight load from the modules of the recording equipment and the slowing layers. The static structural analysis of the MSND detector frame is calculated in a finite element analysis environment. Three-dimensional modeling and production of drawings is carried out in the Creo Parametric program.

Многомодульный сцинтилляционный детектор нейтронов представляет собой чередующиеся слои замедлителей и детекторов нейтронов. По результатам математического моделирования характеристик детектора и экспериментальных исследований свойств отдельных регистрирующих модулей [1,2] сформулированы требования к несущей конструкции МСДН, содержащего 12 регистрирующих нейтроны модулей и 13 модулей замедления нейтронов из полиэтилена:

- обеспечение прочности и жесткости при весовой нагрузке от модулей;

- плотное прижимание модулей по направлению потока нейтронов для устранения воздушного зазора;

- механизм быстрой замены и перестановки модулей без необходимости разбора всей конструкции.

На основании вышеперечисленных требований была разработана рама внутреннего корпуса МСДН. В качестве несущих балок и направляющих выбран алюминиевый конструкционный профиль.

Для устранения воздушных зазоров между отдельными модулями используется винтовой пресс. Выбор конструктивного решения для рамы детектора подтвержден расчетом ее напряженно-деформированного состояния в среде конечно-элементного анализа Creo Parametric. Для моделирования весовой нагрузки элементов конструкции использовано значение суммарной силы 200 Н, соответствующей весу слоев модулей регистрации и замедления нейтронов. Для моделирования нагрузки от винтового стягивания использовано значение силы 500 Н. Материал при этом принимается в виде однородной сплошной среды, которая наделяется свойствами упругости и пластичности.

Результаты расчета параметров конструкции МСДН представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Случай нагружения	Максимальные деформации, мм	Максимальные напряжения, МПа	Предел текучести сплава алюминия при сжатии и растяжении, МПа
Весовая нагрузка 20 кг	0,03	37,6	250
Нагрузка винтовым стягиванием 50 кг	0,27	84,9	250

Максимальные напряжения, возникающие в конструкции, не превышают предела текучести материала более чем с двукратным запасом и, следовательно, эту схему несущей конструкции и выбор материала можно признать пригодным для использования в качестве корпуса МСДН.

Список литературы

1. А.Е.Шустов, А.И.Архангельский, К.Ф.Власик, В.В.Кадили, З.М.Утешев Измерение параметров отклика детектирующей ячейки многослойного детектора нейтронов/ VI Межд. конф. «ЛаПлаз-2020» Сб. науч. тр.. Ч.2. М.: НИЯУ МИФИ, с.367-368, 2020.
2. А.Е.Шустов, К.Ф.Власик, В.В.Кадили, З.М.Утешев Моделирование отклика прототипа многослойного детектора нейтронов/ VI Межд. конф. «ЛаПлаз-2020» Сб. науч. тр. Ч.2. М.: НИЯУ МИФИ, с.369-370, 2020.

Д.И. САВИН, Е.В. РЯБЕВА, И.В. УРУПА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО ПЛАСТМАССОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА ЕJ-276

Для спектрометра на основе пластмассового сцинтиллятора EJ-276 проведено восстановление нейтронных спектров для нейтронного генератора на основе реакции D-T. Произведена оценка энергетического разрешения спектрометра.

D.I. SAVIN, E.V. RYABEVA, I.V. URUPA, R.F. IBRAGIMOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia

UNFOLDING OF NEUTRON SPECTRA FROM THE EJ-276 BASED SPECTROMETER

For a spectrometer based on a plastic scintillator EJ276, neutron spectra were unfolded using a response matrix simulated GEANT4 for the D-T neutron generator. The unfolding was carried out using the least squares method and the GRAVEL method. The energy resolution of the spectrometer was estimated.

В случае измерения экспериментального спектра, полученного на мультиканальном анализаторе, справедливо равенство: $\vec{N} = R\vec{\Phi}$, где \vec{N} – вектор числа отсчетов в i -ом канале, $\vec{\Phi}$ – вектор флюенсов нейтронов в j -ом энергетическом интервале, R – матрица откликов детектора. Задача восстановления спектра заключается в поиске $\vec{\Phi}$ из известных \vec{N} и R .

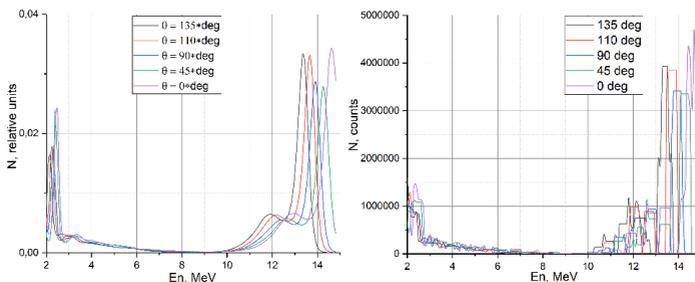


Рис. 1. Восстановленные спектры нейтронов НГ-150М методом GRAVEL (слева) и МНК (справа)

С помощью метода GRAVEL [1] и метода наименьших квадратов (МНК) были восстановлены 5 экспериментальных спектров нейтронного генератора на основе реакции D-T, измеренных при различных углах между детектором и осью нейтронного генератора (Рис.1). Экспериментальные спектры получены на стенде спектрометрии нейтронов с помощью нейтрон-гамма разделения [2].

Для оценки близости восстановленных спектров и реальных спектров, оценивалась близость максимальных энергий нейтронов в спектре с максимальными энергиями протонов отдачи, а также с теоретическими энергиями нейтронов. Из результатов, представленных в таблице 1, можно сделать вывод о том, что оба метода являются идентичными по точности восстановления энергий нейтронов в области реакции D-T.

Таблица 1. Сравнение наиболее вероятных энергий нейтронов в восстановленном спектра с теоретическими энергиями нейтронов и энергиями протонов отдачи

Теоретическая средняя E_n , МэВ	Максимальная E_p по калибровке, МэВ	E_n , (GRAVEL), МэВ	E_n (МНК), МэВ
14.94	14.7±0.2	14.6±0.1	14.7±0.1
14.67	14.5±0.2	14.3±0.1	14.3±0.2
14.06	14.1±0.2	13.9±0.1	13.9±0.2
13.77	13.9±0.2	13.7±0.1	13.7±0.2
13.46	13.6±0.2	13.4±0.1	13.4±0.1

Энергетическое разрешение восстановленных методом GRAVEL спектров определялось как разница между центрами соседних пиков ($\mu_2 - \mu_1$), соответствующих максимальным энергиям нейтрона в одном из измеряемых углов при пересечении данных пиков на половине их высоты. Рассчитанное данным образом разрешение составляет не более 500±50 кэВ.

Список литературы

1. C. YongHao, C. XiMeng, L.JiaRong and others//Science China (Physics, Mechanics & Astronomy). 2014. Vol. 57 №10, P. 1885-1890.
2. Ryabeva E., Urupa I., Lupar E., Kadilin V., Skotnikova A., Kokorev Ya. // NUCLEUS - 2020. LXX Int. conf. Abstract book. Saint Petersburg 2020. С. 412.

Д.И. САВИН, Е.В. РЯБЕВА, И.В. УРУПА
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ПЛАСТМАССОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА EJ-276 С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА D-T НЕЙТРОНОВ

Для спектрометра на основе пластмассового сцинтиллятора EJ-276 получены аппаратурные спектры протонов отдачи нейтронного генератора на основе реакции D-T для различных углов между детектором и осью генератора. По полученным аппаратурным спектрам произведена калибровка спектрометра для нейтронного излучения.

D.I. SAVIN, E.V. RYABEVA, I.V. URUPA,
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

CALIBRATION OF THE PLASTIC SCINTILLATOR EJ-276 - BASED SPECTROMETER USING D-T NEUTRON GENERATOR

For the spectrometer based on the EJ-276 plastic scintillator, the experimental recoil protons spectra of the neutron generator base on D-T reaction are obtained for different angles between the detector and the axis of the generator. The spectrometer was calibrated for neutron radiation using the obtained response spectra.

Данная работа является продолжением работ [1,2] по разделению смешанных гамма-нейтронных спектров детектором на основе пластмассового сцинтиллятора.

Был получен набор аппаратурных спектров протонов отдачи нейтронного генератора на основе реакции D-T. Угол между направлением ускорения ионов (осью генератора) изменялся от 0° до 135°.

Исходя из формы аппаратурного спектра выдвинуто предположение, что особенности в левой части спектров (рис. 1) являются результатом взаимодействия D-D нейтронов с веществом сцинтиллятора, потому как форма данной части спектра изменяется в зависимости от угла вылета нейтронов из мишени аналогично D-T нейтронам.

Как известно, зависимость световыхода L (энергии частицы в электронном эквиваленте) от потерянной энергии протона E_p описывается законом Биркса, который имеет вид[3]: $L(E_p) =$

$S \int_0^{E_{p\max}} \frac{dE_p}{1+kB*\frac{dE}{dx}}$, где S – эффективность сцинтилляции, kB – константа

Биркса $((1.26-2.07)*10^{-2} \text{ г/(МэВ*см}^2\text{)})$ для сцинтилляторов на основе поливинилтолуола), dE/dx – ионизационные потери протона в веществе сцинтиллятора (значения взяты из базы данных NIST pStar).

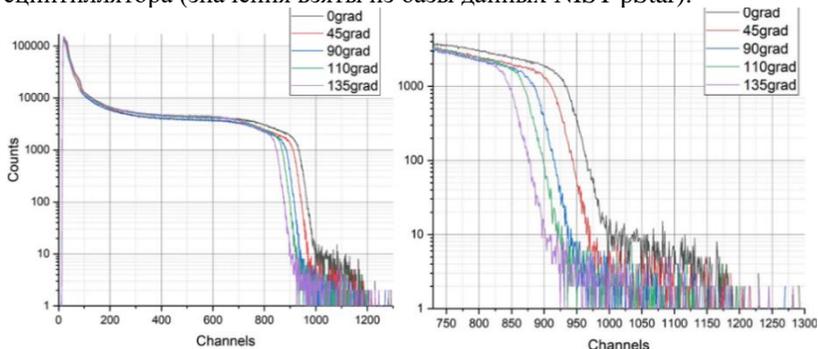


Рис. 1. Аппаратурные спектры генератора нейтронов на основе реакции D-T при разных углах между детектором и осью генератора.

Коэффициенты S и kB определялись таким образом, чтобы $L(E_p)$ наиболее близко удовлетворяло соотношению между теоретическими энергиями нейтронов (протонов, МэВ) и максимумам производных функций, полученных при дифференцировании спектров.

Полученная зависимость световых выходов от энергии протона имеет вид:

$$L(E_p) = 0.73 \int_0^{E_{p\max}} \frac{dE_p}{1+0.013*\frac{dE}{dx}} \quad (1)$$

С помощью зависимости, описанной формулой (1) возможно проводить калибровку спектрометра по энергиям протонов в диапазоне от 500 кэВ до 15 МэВ.

Список литературы

1. S.Nyibule, J. Toke, E. Henry and others// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2014. Vol. 768, P. 141-145.
2. Урупа И.В., Лупарь Е.Э., Кадили В.В., Рябева. Разделение смешанных гамма-нейтронных спектров детектором на основе органического сцинтиллятора. VI меж. конф. Лаплаз-2020». Сб. тр. Москва, 2020.
3. Урупа И.В., Лупарь Е.Э., Скотникова А.В., Кадили В.В., Рябева Е.В. КАЛИБРОВКА спектрометра на основе органического сцинтиллятора EJ-276 для экспериментов по разделению смешанных гамма-нейтронных спектров. VI меж. конф. Лаплаз-2020». Сб. тр. Москва, 2020.

Д.И. САВИН, Е.В. РЯБЕВА, И.В. УРУПА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА n-γ РАЗДЕЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО ПЛАСТМАССОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА EJ-276

Был рассмотрен и использован метод разделения смешанного нейтронного и гамма-излучений по форме электрического импульса (Pulse Shape Discrimination) в органических сцинтилляторах. Для спектрометра на основе пластмассового сцинтиллятора EJ-276 получены PSD спектры для изотопных источников PuBe, ²⁵²Cf и генератора нейтронов на основе реакции D-T. Произведена оценка качества разделения.

D.I. SAVIN, E.V. RYABEVA, I.V. URUPA,

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

ESTIMATION OF THE EJ-276 PLASTIC SCINTILLATOR PULSE SHAPE DISCRIMINATION QUALITY

The method of separation of mixed neutron and gamma radiation by the shape of an electric pulse (Pulse Shape Discrimination) in organic scintillators was considered and used. For the spectrometer based on the plastic scintillator EJ-276, PSD spectra were obtained for isotope sources PuBe, ²⁵²Cf and D-T neutron generator. The quality of separation was assessed.

Органические сцинтилляторы способны разделять нейтроны и γ-излучение, т.к. нейтроны и гамма-кванты по-разному взаимодействуют с веществом сцинтиллятора, вследствие чего электрические импульсы от нейтронов и гамма-квантов отличаются по своей форме[1]. Это различие легло в основу аналоговых и цифровых методов разделения частиц по форме сигналов. В качестве органического сцинтиллятора в работе использовался пластмассовый сцинтиллятор EJ-276.

Параметр PSD, используемый для разделения сигналов по форме импульса, определяется следующим образом: $PSD = \frac{Q_{long} - Q_{short}}{Q_{long}}$, где Q_{long} и Q_{short} – интегралы импульса в соответствующих временных окнах, подбираемых вручную. Как критерий эффективности разделения используется величина FoM (Figure of merit): $FoM = \frac{\max_n - \max_\gamma}{FWHM_n + FWHM_\gamma}$ где \max_n , \max_γ – максимумы PSD распределения для нейтронов и γ-излучения, а $FWHM_n$, $FWHM_\gamma$ – ширина пиков на полувысоте для

нейтронов и γ -излучения. FoM рассчитывается для определенного энергетического порога, устанавливаемого вручную.

В работе PSD-спектры (в качестве примера на рис. 1 приведен PSD спектр НГ-150М) были получены с помощью дигитайзера CAEN DT5730В. В нем же устанавливались временные окна для сигнала, энергетический порог и другие параметры.

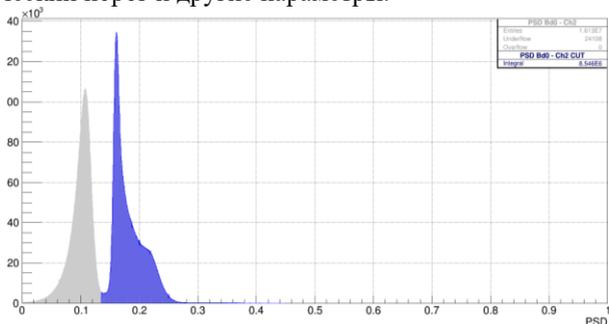


Рис. 1. PSD спектр НГ-150М для потока 9.5×10^8 нейтронов/с.

В качестве источников смешанного нейтронного и гамма-излучения в работе применялись изотопные источники PuBe, ^{252}Cf и генератора D-T нейтронов. Для каждого источника был получен аппаратурный спектр и PSD-спектр, был рассчитан критерий качества п- γ разделения.

Параметры FoM составили (порог регистрации 300 кэВ): для генератора D-T: 1.393 ± 0.008 , для ^{252}Cf : 1.24 ± 0.03 FoM, для PuBe: 1.27 ± 0.03 . Установлено, что значение FoM не меняется в диапазоне от 10^6 н/(с \times см 2) до 10^9 н/(с \times см 2).

Критерий FoM больше 1 для всех источников, что подтверждает возможность разделения нейтронов и гамма-излучения с помощью спектрометра с пластмассовым сцинтиллятором EJ-276.

Дигитайзер CAEN DT5730В позволяет осуществлять режекцию наложенных импульсов, что позволяет повысить качество разделения.

В будущем планируется модернизация детектора с использованием кремниевых ФЭУ вместо вакуумных, что также позволит повысить качество разделения.

Список литературы

1. Cherpunov A.S., Kirsanov M.A., Klenin A.A. and others // Journal of Physics: Conference Serie. 2017. Vol. 934, P. 12-57

О.Г. СТРУЧЕНКОВА, С.П. МАСЛЕННИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ В ИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ ПЕННИНГА

В работе представлены результаты моделирования магнитных полей в ионных источниках Пеннинга с использованием различных магнитных материалов в условиях изменения температурных режимов работы газонаполненных нейтронных трубок.

O.G. STRUCHENKOVA, S.P. MASLENNIKOV

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

STUDY OF THE INFLUENCE OF THERMAL OPERATING MODES ON THE CHARACTERISTICS OF MAGNETIC SYSTEMS IN PENNING ION SOURCES

The paper presents the results of modeling magnetic fields in Penning ion sources using various magnetic materials under conditions of changing temperature regimes of gas-filled neutron tubes.

Исследования режимов работы импульсных нейтронных генераторов в составе каротажных приборов показывают, что режимы горения разряда Пеннинга в ионных источниках нейтронных трубок зависят от температуры окружающей среды. В этой связи проведение исследований амплитудно-временных характеристик ионных источников Пеннинга в зависимости от внешней температуры является актуальным для решения задач по повышению стабильности работы оборудования для геофизического исследования скважин [1].

Расчетный анализ влияния температуры на параметры магнитного поля, формируемого в ионных источниках, был проведен для конфигурации магнитных систем на основе магнитов с габаритными размерами K26x20x25, в предположении использования для их изготовления магнитного материала $NdFeB$ с «повышенной» термостабильностью.

Расчетные зависимости индукции поля на оси одиночных кольцевых магнитов с размерами K26x20x5, изготовленных из $NdFeB$ (N35), при температурах 20°C и 120°C приведены на рисунке 1(а). На рисунке 1(б) представлены расчетные зависимости продольной компоненты

индукции магнитного поля от координаты вдоль оси ионного источника нейтронной трубки.

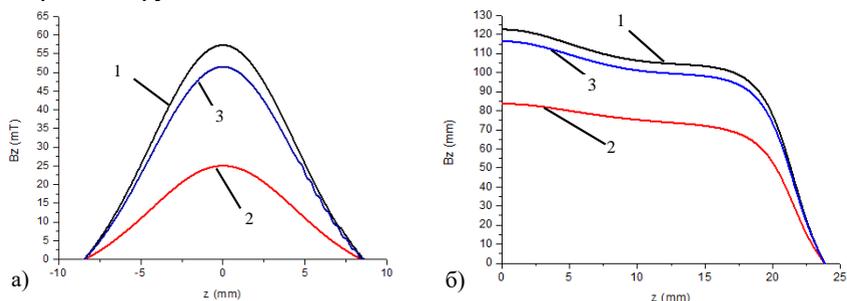


Рис. 1 Зависимости аксиального магнитного поля от координаты вдоль оси одиночных магнитных колец (а) и на оси ионного источника (б) при различных температурах: 1 – NdFeB, $T=20^{\circ}\text{C}$; 2 – NdFeB, $T=120^{\circ}\text{C}$; 3 – NdFeB ($\alpha(\text{Br})=0,03\text{ \%/}^{\circ}\text{C}$, $\alpha(\text{Hc})=0,18\text{ \%/}^{\circ}\text{C}$), $T=120^{\circ}\text{C}$

Сравнительная оценка результатов расчетов, а также экспериментальных измерений параметров кольцевых магнитов показывает, что магнитное поле в ионном источнике более устойчиво к изменениям температуры по сравнению с полем отдельных магнитных колец.

При проведении расчетов с NdFeB были использованы характеристики материала, которые соответствуют стандартным характеристикам магнита по данным производителя ($\alpha(\text{Br})=0,12\text{ \%/}^{\circ}\text{C}$ - температурный коэффициент индукции и $\alpha(\text{Hc})=0,75\text{ \%/}^{\circ}\text{C}$ - температурный коэффициент коэрцитивной силы). Полученные результаты показали, что нагрев магнитной системы на 100°C приводит к недопустимому снижению индукции магнитного поля: для отдельных колец индукция уменьшилась на 54%, на оси ионного источника спад поля достиг 32%. (граф.1 и 2).

Для обеспечения условий, при которых при нагреве магнитной системы ее параметры остаются в оптимальном диапазоне работы ионного источника [2], требуется применение материалов с $\alpha(\text{Br})=0,03\text{ \%/}^{\circ}\text{C}$ и $\alpha(\text{Hc})=0,18\text{ \%/}^{\circ}\text{C}$. (граф.3).

Список литературы

1. Р.С. Рачков, С.П. Масленников и др. // Атомная энергия, 2019, Т. 127, №1 (7), с.39-43.
2. Н.В. Мамедов, С. П. Масленников и др. // Физика плазмы, 2020, т. 46, № 2, с. 172–185.