

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

**VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ»
ЛАПЛАЗ-2022,
посвященная 100-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии
по физике Басова Николая Геннадиевича**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

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

ББК:22.31:72

М 43

VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2022, посвященная 100-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии по физике Басова Николая Геннадиевича: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. – 453 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу VIII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2022», которая пройдет с 22 по 25 марта 2022 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, синхротронные и нейтронные методы исследования новых материалов.

Статьи получены до 8 марта 2022 года. Материалы издаются в авторской редакции.

Ответственный редактор: Крупышева Полина Олеговна

ISBN 978-5-7262-2855-6

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2022

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 – генеральный директор 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
- 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

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	5
СЕКЦИЯ ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	28
Х. БАРХУМ, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, А.С. ШИШКИНА ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ПРООБРАЗОВ МИКРОКАНАЛОВ ВНУТРИ СТЕКЛА.....	29
Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ, У.Ш. АБДИРАХМОНОВ АНИЗОТРОПИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ $LiTaO_3$	30
Е.А. АВИЛОВА, Е.А. ЕЛТЫШЕВА, Д.А. СИНЕВ, В.П. ВЕЙКО, А.Ю. ШИШОВ, Е.М. ХАЙРУЛИНА, И.И. ТУМКИН УПРАВЛЯЕМОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ В СРЕДЕ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ	31
А.Г. АНИСОВИЧ, М.И. МАРКЕВИЧ, В.И. ЖУРАВЛЕВА, Д.Ж. АСАНОВ ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ В ВОДНОЙ СРЕДЕ ИЗ МИШЕНИ СИЛУМИНА	32
Н.А. АФАНАСЬЕВ, Е.В. ПРОКОФЬЕВ, М.К. МОСКВИН, Г.В. ОДИНЦОВА ЛИППС - ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДУЖНЫХ ГОЛОГРАММ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА	33
В.Н. ТИЩЕНКО, А.Г. БЕРЕЗУЦКИЙ, Л.Р. ДМИТРИЕВА, Ю.П. ЗАХАРОВ, И.Б. МИРОШНИЧЕНКО, В.Г. ПОСУХ, А.А.ЧИБРАНОВ, И.Ф. ШАЙХИСЛАМОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МГД ВОЛНЫ	34
В.П. БИРЮКОВ ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ	35
В.П. БИРЮКОВ, А.Н. ПРИНЦ, А.А. ЯКУБОВСКИЙ ПОВЫШЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ	36
А.Г. БОНДАРЕНКО, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОКАНАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ CO_2 -ЛАЗЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ	37
А.С. БОРИСЕНКО, Н.В. СЕМЕНИН, И.В. ЗАЛИВАКО, И.А. СЕМЕРИКОВ, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПОВ НАГРЕВА И ТЕМПЕРАТУРЫ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ В ..	38
М.Р. БУТАЕВ, В.И. КОЗЛОВСКИЙ, Я.К. СКАСЫРСКИЙ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С ПРОДОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $CdS/ZnSe$ С РАЗРЫВАМИ ЗОН ВТОРОГО ТИПА	39
Н.Д. БУХАРСКИЙ, Ю.В. КОЧЕТКОВ, Ф.А. КОРНЕЕВ ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С КОЛЬЦЕВОЙ МИШЕНЬЮ	40
С.Л. ВЕРХОШЕНЦЕВА СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	41
Л.С. ВОЛКОВ, Н.Н. АНТОНОВ, А.В. ГАВРИКОВ, Г.Д. ЛИЗЯКИН, А.О. СЕРОВ ЛАЗЕРНОЕ ИСПАРЕНИЕ ОКСИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЛАЗМЕННОЙ МАСС-СЕПАРАЦИИ	42
В.Д. ВОРОНОВ, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, С.И. ГЛЕБОВА, Д.А. ДЕШИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ СОЗДАНИЕ ПАРАМАГНИТНЫХ ОБЛАСТЕЙ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $Fe-Cr-Ni$ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА.....	43
А. А. ГАРМАТИНА, В.М. ГОРДИЕНКО, А.А. КОРШУНОВ, М. Д. МОЖАЕВА, А.И. БАРАНОВ, Д.В. МЯСНИКОВ, И.Г. ДЬЯЧКОВА, В.Е. АСАДЧИКОВ, Н.В. МИНАЕВ ЭФФЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ЗАДАЧ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ.....	44

А.Ф. ГЛОВА, И.Д. КЛОЧКОВ, А.Ю. ЛЫСИКОВ, Л.И. КНЯЗЕВА, А.Н. КИРИЧЕНКО, В.А. БАРСУК ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТВЕРДОСПЛАВНЫЙ РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ	45
В.Л. ГОРШЕНИН, В.Е. РОДИМИН ВЛИЯНИЕ РАЗЪЮСТИРОВОК ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ПОТЕРИ АТМОСФЕРНОГО КАНАЛА УСТАНОВКИ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ	46
Е.А. ДАВЫДОВА, Н.Н. ЩЕДРИНА, В.М. ПРОКОПЬЕВ, И.А. ФИЛАТОВ, А.М. АРБУЗОВ, Г.В. ОДИНЦОВА УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ И АЛЮМИНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРИДАНИЯ АНТИКОРРОЗИОННЫХ И ПРОТИВООБРАСТАЮЩИХ СВОЙСТВ	47
Е.А. ДАНИЛОВ, С.А. УРЮПИН ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МЕТАЛЛ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	48
А.Д. ДОЛГОПОЛОВ, В.Р. ГРЕСЬКО, В.В. СМИРНОВА, М.М. СЕРГЕЕВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ПОВЫШЕНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ZNO ПЛЕНОК С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА	49
М.С. ГРИГОРЬЕВА, А.Ю. ХАРИН, И.А. ЕВДОКИМОВА, И.Н. ЗАВЕСТОВСКАЯ, В.Ю. ТИМОШЕНКО ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ МИШЕНИ НА ПОРОГ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ	50
К.А. ЕГОРОВА, К.А. РОЗАНОВ, Д.А. СИНЕВ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМОЙ ОКСИДИЗАЦИИ НА ЗНАЧЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ПРИ АДДИТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ	51
В.Ю. ЖЕЛЕЗНОВ, Т.В. МАЛИНСКИЙ, В.Е. РОГАЛИН, Ю.В. ХОМИЧ НАНОВЫСТУПЫ НА ЗЕРКАЛАХ ИЗ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ, ВОЗНИКШИЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ УФ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	52
К.Ф. ЗНОСКО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ХЕС1-ЛАЗЕР ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛОВ	53
И.Г.ЗУБАРЕВ, В.Ф.ЕФИМКОВ, А.А.ГОРДЕЕВ ВЛИЯНИЕ ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ТОЛУОЛЕ	54
И.Г. ЗУБАРЕВ, В.Ф. ЕФИМКОВ, А.А. ГОРДЕЕВ РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ	55
Н.А. ИНОГАМОВ, В.В. ЖАХОВСКИЙ, Ю.В. ПЕТРОВ, В.А. ХОХЛОВ, В.В. ШЕПЕЛЕВ, С.В. ФОРТОВА, Е.А. ПЕРОВ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОИЗВОДСТВО НАНОЧАСТИЦ И УПРОЧНЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ	56
Э.Д. ИШКИНЯЕВ, Е.В. ХРИПТОВИЧ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, И.Н. ШИГАНОВ ПОЛУЧЕНИЕ ЗАДАННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ СКАНИРУЮЩИМ ЛУЧОМ	57
Е.И. КАЗАНЦЕВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, С.А. ЗИБРОВ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ ОБ ИЗМЕРЕНИИ АМПЛИТУДЫ СВЧ МОДУЛЯЦИИ ТОКА НАКАЧКИ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ	58
С.Ф. УМАНСКАЯ, М.А. ШЕВЧЕНКО, А.Д. КУДРЯВЦЕВА, М.А. КАРПОВ, Н.В. ЧЕРНЕГА, А.Н. МАРЕСЕВ, К.И. ЗЕМСКОВ, А.И. ВОДЧИЦ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛУЧАЙНОЙ РАМАНОВСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ	59
И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ, Я.В. ГРУДЦЫН, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, В.И. КОВАЛЕВ, Д.В. ПУШКАРЕВ, Е.Э. ДУНАЕВА, А.А. ИОНИН ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ТИТАН САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В РАЙОН ДЛИНЫ ВОЛНЫ 11 МКМ С ПОМОЩЬЮ ВКР ВАWO ₄ И ГРЧ LiGaS ₂ КРИСТАЛЛОВ	60
Я.А. КОВАЛЁВА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ПО РАЗМЕРАМ, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ	61

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В УСИЛИТЕЛЯХ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ	62
И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ УСИЛЕНИЕ И КОМПРЕССИЯ ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ В АКТИВНОМ НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ.....	63
А.В. ЛАСТОВСКИЙ, И.С. ШАРАПОВ, Е.М. АЛЕКСЕЕВА, Я.И. КИМ РАЗРАБОТКА СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ МИКРО СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ	64
А.А. ЛИСКОВИЧ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ NI-CR СПЛАВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ.....	65
К.С. ЛУКЬЯНОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, И.Ю. ТИЩЕНКО, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ РАЗРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНОГО ВОЛОКОННОГО ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ	66
М.А. КАРДАПОЛОВА, Н.И. ЛУЦКО, Л.И. ПИЛЕЦКАЯ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ В ВАЛИКАХ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ	67
С.А. ЛЫСЕНКО, Н.Н. ЮРЫШЕВ, Н.П. ВАГИН ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ ИЗ САМОСВЯЗАННОГО SiC С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	68
Д.В. МАРИН, А.С. ЩЕКИН, А.А. КОЛЧИНА, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В МЕТАЛЛАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	69
И.А. НОВИКОВ, И.Ю. ТИЩЕНКО, К.Л. ГУБСКИЙ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ.....	70
Е.А. ПОНОМАРЕВА, А.О. ИСМАГИЛОВ, А.Н. ЦЫПКИН ДИНАМИКА ОТРАЖЕНИЯ СУБПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ В ЖИДКОСТЯХ.....	71
В.А. ГОРШКОВ, А.В. СМИРНОВА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ОПТИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ И СИСТЕМАМИ ЛАЗЕРОВ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ.....	72
А.Г. ПУТИЛОВ, А.А. АНТИПОВ, А.Е. ШЕПЕЛЕВ, К.М. СТАНКЕВИЧ, И.И. ПРИВОНОВ ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПЕРЕСТРОЙКИ СПЕКТРА ГЕНЕРАЦИИ ВИБРОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ХРОМА	73
В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ, С.А. МАЙОРОВ, Г.Б. РАГИМХАНОВ, З.Р. ХАЛИКОВА ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯД В ГЕЛИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	74
А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ, А.А. КОТКОВ, А.М. САГИТОВА, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, Д.В. СИНИЦЫН, О.А. РУЛЕВ ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ СО- И СО ₂ -ЛАЗЕРОВ	75
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, П.М. САЙПУЛАЕВ, Р.М. ЭМИРОВ, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ, А.Э. РАБАДАНОВА ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА РАЗМЕР КРИСТАЛЛИТОВ В НАНОПОРОШКЕ VAZRO ₃	76
К.К. САМАРХАНОВ, Э.Г. БАТЫРБЕКОВ, М.У. ХАСЕНОВ, Ю.Н. ГОРДИЕНКО, Ю.В. ПОНКРАТОВ, Е.Ю. ТУЛУБАЕВ, В.С. БОЧКОВ, А.Н. СЛУЯНОВ, С.В. ТОЛМАЧЕВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВЫХ СРЕД ПРИ НАКАЧКЕ ПРОДУКТАМИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ⁶ Li(N,A) ³ H В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА.....	77
Н.С. СЕМИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, П.А. ДАНИЛОВ, С.И. КУДРЯШОВ, А.В. КОРИБУТ ДВУХ-ФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КРИСТАЛЛЕ SA ₃ (VO ₄) ₂ ЛЕГИРОВАННОМ СТРОНЦИЕМ.....	78

А.Р. СУВОРОВ, Д.А. СИНЕВ УПРАВЛЯЕМОЕ ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР НА ТОНКИХ ПЛЁНКАХ ТИТАНА	79
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, С.А. УСПЕНСКИЙ ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖЕК НА ФОРМИРОВАНИЕ КОРНЯ ШВА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН	80
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, С.А. УСПЕНСКИЙ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МЕДНЫХ ПЛАСТИН ТОЛЩИНОЙ 1,5 ММ	81
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, С.А. УСПЕНСКИЙ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА С АКСИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ПОРОШКА ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ С ЗАЗОРОМ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ТОЛЩИНОЙ 2,5 ММ	82
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, С.А. УСПЕНСКИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ЗАЗОРА ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ТОЛЩИНОЙ ОТ 1 ДО 6 ММ	83
И.А. ФРОЛОВ, С.Р. АЛЛАЯРОВ, Е.М. ТОЛСТОПЯТОВ, А.В. УТКИН, П.Н. ГРАКОВИЧ, Л.Ф. ИВАНОВ, В.М. МАКАРЕНКО, Л.А. КАЛИНИН ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСА ОТДАЧИ ПРОДУКТОВ ИК ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛИСТИРОЛА И ПОЛИСТИРОЛА С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ	84
И.Н. ЗАВЕСТОВСКАЯ, В.А. ГУЩИН, Л.И. РУССУ, Е.А. ЧЕШЕВ, А.Л. КОРОМЫСЛОВ, И.М. ТУПИЦЫН, А.А. ФРОНЯ, М.С. ГРИГОРЬЕВА ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ НА ИНАКТИВАЦИЮ КОРОНАВИРУСА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ UVA ИЗЛУЧЕНИЕМ	85
Д.С. ЧУЧЕЛОВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, С.А. ЗИБРОВ, К.М. САБАКАРЬ, В.П. ЯКОВЛЕВ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА, ВЫДЕЛЯЕМОГО ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ РЕЗОНАНСНЫХ АТОМНЫХ ЯЧЕЕК	86
А.А. ШАМОВА, Д.С. ПОЛЯКОВ, Г.Д. ШАНДЫБИНА УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ 3D НАКОПИТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ	87
А.Е. ШЕПЕЛЕВ, А.А. АНТИПОВ, А.Г. ПУТИЛОВ, К.М. СТАНКЕВИЧ, И.И. ПРИВОНОВ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОЛЛИМАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА	88
В.А. ШКУРАТОВА, Г.К. КОСТЮК, А.А. ПЕТРОВ, А.А. САМОХВАЛОВ МНОГОСЕКТОРНЫЕ БИНАРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ	89
А.С. ЩЕКИН, А.К. ЖАНАБАЕВА, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ ВЛИЯНИЕ ВИДА ТЕКСТУРЫ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ КРЕМНИЯ ПРИ ПРЯМОМ НАНОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ТЕКСТУРИРОВАНИИ	90
В.М. ЯМЩИКОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ АТОМОВ КАЛИЯ, НА ВРЕМЯ ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ	91
СЕКЦИЯ ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	92
М.С. ОЛИВЕЙРА, М. ЮСУПОВ, Р.М. КОРДЕЙРО, А. БОГАРТС КАК ЛИПИДНЫЕ АЛЬДЕГИДЫ РАСПРЕДЕЛЯЮТСЯ В ФАЗОВО-РАЗДЕЛЕННЫХ МЕМБРАНАХ: РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	93
М.С. ОЛИВЕЙРА, М. ЮСУПОВ, Р.М. КОРДЕЙРО, А. БОГАРТС ПЕРЕНОС РЕАКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И АЗОТА ЧЕРЕЗ НИТРИРОВАННЫЕ МЕМБРАНЫ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	94
А.В. АКСЕНОВ, А.Д. ПОЛЯНИН, В.Г. СОРОКИН О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ ПОСТРОЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ УРЧП БЕЗ ЗАПАЗДЫВАНИЯ И С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ	95
Д.В. АЛЯБЬЕВ, И.Д. ЯДГАРОВ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ ФУЛЛЕРЕНОВ ПРИ ИХ НАГРЕВАНИИ	96
А.А. БАЙРАМУКОВ, Н.А. КУДРЯШОВ, А.А. КУТУКОВ ПРОГРАММНЫЙ КОД ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛИНОМОВ, СВЯЗАННЫХ С ТОЧЕЧНЫМИ ВИХРЯМИ НА ПЛОСКОСТИ	97

С.П. БАУТИН, В.Е. ЗАМЫСЛОВ, А.Г.ОБУХОВ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ	98
С.П. БАУТИН, Ю.В.НИКОЛАЕВ, Е.И.ПОНЬКИН ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МИШЕНЯМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА.....	99
К.В. БРУШЛИНСКИЙ, В.В. КРЮЧЕНКОВ, Е.В. СТЕПИН РАСЧЕТ ДИНАМИКИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ РАВНОВЕСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ, ОКРУЖАЮЩИХ ПРОВОДНИК С ТОКОМ	100
А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ ДЕТАЛЕЙ В СРЕДЕ ANSYS WORKBENCH	101
В.Л. КАМЫНИН ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОБ ИСТОЧНИКЕ ДЛЯ МНОГОМЕРНОГО НЕРАВНОМЕРНО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ	102
К.В. КАН, Н.А. КУДРЯШОВ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ВОЛН, ОПИСЫВАЕМЫХ ОБОБЩЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УРАВНЕНИЕМ ШРЕДИНГЕРА	103
И.М. КОЗЛОВ, А.В. ТЕТЕРЕВ, Л.К. СТАНЧИЦ, Н.И. МИСЮЧЕНКО МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ В АДИАБАТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ИЛИ В ТЕРМОСТАТЕ	104
А.В. КРЯНЕВ, А.С. КОННОВА СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЁХ СХЕМ: СХЕМЫ МАРКОВИЦА, СХЕМЫ VAR И СХЕМЫ, ОСНОВАННОЙ НА ВЕРОЯТНОСТЯХ ПРИОРИТЕТА	105
В.В. КУЗЕНОВ, П.Д. БРОСИН МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ..	106
С. Ф. ЛАВРОВА, Н.А. КУДРЯШОВ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЛЬНИКОВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАОСА В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ С НАСЫЩЕНИЕМ	107
З.Д. ЛИВЕНЕЦ, А.Ю. ЛУГОВСКИЙ ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В АККРЕЦИОННЫХ ЗВЕЗДНЫХ ДИСКАХ.....	108
С.Ю. МИСЮРИН, Г.В. КРЕЙНИН, Н.Ю. НОСОВА РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ.....	109
Р.В. МУРАТОВ, П.Н. РЯБОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ДИАГРАММ ВОРОНОГО ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ.....	110
В.В. НАЗАРОВ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРРОЗИИ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПЛОСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ И ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	111
А.П. ПИЛИПЧУК, О.Г. ДЕВОЙНО МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	112
В.М. РЕЧКИН, Ю.А. ВЯТКИН, М.А. ПУХОВ, Е.С. МЕДВЕДЕВ ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДЕРЖАТЕЛЯ КАНТОВАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА АЭС	113
И.Д. РУБЦОВА, Л.В. ВЛАДИМИРОВА, А.Ю. ЖДАНОВА, Н.С. ЕДАМЕНКО ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА С МУТАЦИЕЙ	114
В.М.РУДЕНКО, Е.В.КОРОТКОВ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА MANDS ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОМОТОРОВ В ГЕНОМЕ ПЕРЦА.....	115
Г.В. РЫЛЬКОВ, А.Г. СБОЕВ, Р.Б. РЫБКА НОРМАЛИЗАЦИЯ СУЩНОСТЕЙ В РУССКОЯЗЫЧНЫХ ТЕКСТАХ ИНТЕРНЕТ-ОТЗЫВАХ О ПРЕПАРАТАХ	116
М.С. СКОРОХОДОВ, А.Г. СБОЕВ О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЗГЛЯДОУКАЗАНИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ РЕЧЕВЫХ КОМАНД РОБОТУ	117
А.В. ТЕТЕРЕВ, И.М. КОЗЛОВ, Л.В. РУДАК, П.А. МАНДРИК МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ	118

С.А. ТЮФЛИН, О.В. НАГОРНОВ, Т.И. БУХАРОВА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАЛЕОКЛИМАТА НА ОСНОВЕ СКВАЖИННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	119
В.В. ЦЕГЕЛЬНИК О РЕШЕНИЯХ СИСТЕМЫ ДВУХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СО СВОЙСТВОМ ПЕНЛЕВЕ	120
В.А. ШЕИН, А.Г. СБОЕВ, Р.Б. РЫБКА ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ПУТИ В ИМИТАЦИОННОЙ СРЕДЕ	121
СЕКЦИЯ ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ	122
С.А. КРАТ, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.И. АЛИЕВА, Н.Е. ЕФИМОВ, Е.А. ВИНИЦКИЙ, Д.Л. УЛАСЕВИЧ, А.Д. ИЗАРОВА, Ф.С. ПОДОЛЯКО, А.И. МЕЩЕРЯКОВ, И.А. СОРОКИН, А.В. МЕЛЬНИКОВ, А.В. ГРУНИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.В. КАЗИЕВ, Д.В. КОЛОДКО, А.С. ИСАКОВА, А.С. БЕЛОВ, К.Л. ГУБСКИЙ ТОКАМАК МИФИСТ-0: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	123
А.И. МЕЩЕРЯКОВ, И.А. ГРИШИНА ДИНАМИКА УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ И НЕКОТОРЫЕ ЭФФЕКТЫ, ОБНАРУЖЕННЫЕ В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М.....	124
А.Н. ШМЕЛЕВ, Г.Г. КУЛИКОВ, В.А. АПСЭ, В.Б. ГЛЕБОВ., Е.Г. КУЛИКОВ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО КАТАЛИЗА ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В ТРЁХКОМПОНЕНТНОЙ (D-T- ³ HE)-ПЛАЗМЕ	125
А.В. ГОЛУБЕВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ.....	126
А.Г. ПОЛЕТАЕВА, Е.Г.КАВЕЕВА,В.А.РОЖАНСКИЙ,И.Ю.СЕНИЧЕНКОВ,И.Ю.ВЕСЕЛОВА ОЦЕНКА ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВНЕШНЕМ ОБВОДЕ ТОКАМАКА НА БАЗЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОДОМ SOLPS-ITER	127
Е.Д. МАРЕНКОВ, А.А. ПШЕНОВ, А.С. КУКУШКИН МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ И ТЕЧЕНИЯ ЛИТИЯ В ТОКАМАКЕ Т-15МД В КОДЕ SOLPS 4.3	128
К.А. КУКУШКИН, А.Ю. ЯШИН ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛАМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2	129
Я.М. АММОСОВ, Ф.О. ХАБАНОВ, М.А. ДРАБИНСКИЙ, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ, А.В. МЕЛЬНИКОВ, Н.К. ХАРЧЕВ, С.Е. ЛЫСЕНКО РАДИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАМ И КВАЗИКОГЕРЕНТНОЙ МОДЫ В ОМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10.....	130
С.Д. СУНЦОВ, Г.А. САРАНЧА, А.В. МЕЛЬНИКОВ, М.А. ПОПОВА, Н.Н. КАСИМОВА, Г.П. ТИМКОВСКИЙ, А.М. СТОЛБОВ, А.Ю. БАЛАШОВ, А.В. СТЁПИН, А.А. ЛОГИНОВ, О.Т. КАЛИНИНА КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ТОКАМАКЕ GOLEM.....	131
Д.Е. ДИАС МИХАЙЛОВА, А.С. ДРОЗД, А.С. КИРИЛЛОВ, Д.С. СЕРГЕЕВ ОЦЕНКА ФАЗОВОГО ЭФФЕКТА В СИГНАЛАХ ВЕРТИКАЛЬНОГО КАНАЛА СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-15МД.....	132
А.А. МАКАРОВ, С.А. КРАТ, Д.Л. КИРКО, Н.Е. ЕФИМОВ, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.И. АЛИЕВА, А.С. САВЁЛОВ Г.Х. САЛАХУТДИНОВ ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА МЯГКОЙ КОМПОНЕНТЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ «МИФИСТ»	133
Е.Ю. БРАГИН, Е.А. БУНИН, А.С. ДРОЗД, Д.С. СЕРГЕЕВ, А.Е. СУХОВ ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ГЕТЕРОДИННЫМ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ 95 ГГц НА СТЕНДЕ ПН-3	134
Е.Н. СТАНКЕВИЧ, Я.А. САДОВСКИЙ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ СБОРА ВОЛЬФРАМОВОЙ ПЫЛИ.....	135
А.Д. ИЗАРОВА, А.С. ПРИШВИЦЫН, Н.Е. ЕФИМОВ, А.И. АЛИЕВА, С.А. КРАТ КОЛЬЦЕВОЙ ЛИМИТЕР ТОКАМАКА «МИФИСТ-0»	136

С.А. НОРОВ, Ф.О. ХАБАНОВ ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ДЕТЕКТОРНЫХ СЕТОК ОТ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПРИСТРЕЛКИ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД.....	137
А.С. БЕЛОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, С.А. КРАТ, А.И. АЛИЕВА, Н.Е. ЕФИМОВ, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.П. КУЗНЕЦОВ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА "МИФИСТ" НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА.....	138
Р.О. ГАВРИЛИН, А.О. ХУРЧИЕВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, С.А. ВЫСОЦКИЙ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ, И.В. РУДСКОЙ, В.А. ВОЛКОВ, А.А. ДРОЗДОВСКИЙ, Р.П. КУЙБЕДА, П.А. ФЕДИН, С.М. САВИН, А.П. КУЗНЕЦОВ ИЗМЕРЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ПОТЕРЬ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА С ЭНЕРГИЕЙ 100 КЭВ/А.Е.М. В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ	139
Е.Ю. ТУЛУБАЕВ, Ю.В. ПОНКРАТОВ, Ю.Н. ГОРДИЕНКО, И.Л. ТАЖИБАЕВА, А.В. ВЕРТКОВ, М.Ю. ЖАРКОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИТИЕВЫХ КПС В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО И ПЛАЗМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЙ.....	140
К.М. ГУТОРОВ РАЗРАБОТКА МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	141
И.Д. ЕГОРОВ, Ю.С. КОРОЛЕВА, Д.Ф. АБДРАХМАНОВ КООКСИАЛЬНЫЙ АБЛЯЦИОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	142
К.М. ГУТОРОВ, А.А. КАРТАШЕВА, Н.С. КЛИМОВ, В.П. БАХТИН, Д.В. КОВАЛЕНКО, В.Л. ПОДКОВЫРОВ, Р.В. УРЛОВА, А.Д. ЯРОШЕВСКАЯ, Е.И. МИНТУСОВ ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ.....	143
К.М. ГУТОРОВ, А.Д. ЯРОШЕВСКАЯ, А.А. КАРТАШЕВА, Н.С. КЛИМОВ, В.П. БАХТИН, Д.В. КОВАЛЕНКО, В.Л. ПОДКОВЫРОВ, Р.В. УРЛОВА, А.В. МЕЛЕШКО ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ТЕЧЕНИЯ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ	144
Ф.А. БЕЛОЛУЦКИЙ, Т.В. КАЗИЕВА, А.А. МОРОЗОВ, В.Н. РЕШЕТОВ, М.В. РЕШЕТОВА АНАЛИЗ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ	145
Д.Б. ЗОЛОТУХИН, Е.М. ОКС, А.В. ТЮНЬКОВ, Ю.Г. ЮШКОВ ПРОГРЕСС В ИЗУЧЕНИИ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ.....	146
К.С. НОВИКОВА, В.В. КРАВЧЕНКО, Д.П. КНЯЖЕВ, Д.Д. БЕРНТ, А.А. ПИСАРЕВ ОМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОЗРАЧНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОКСИДНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ МОДУЛЕЙ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА, ПРИ ИХ ОКРАШИВАНИИ	147
Г.Д. ЛИЗЯКИН, Н.Н. АНТОНОВ, А.В. ГАВРИКОВ, А.Д. МЕЛЬНИКОВ, А.П. ОЙЛЕР, В.П. СМИРНОВ, Р.А. ТИМИРХАНОВ, Р.А. УСМАНОВ, Л.С. ВОЛКОВ, Н.А. ВОРОНА ПЛАЗМЕННАЯ МАСС-СЕПАРАЦИЯ В КОНФИГУРАЦИИ С ЛИНЕЙНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМОЙ	148
И.А. СОРОКИН, Д.В. КОЛОДКО ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОДАЧЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ.....	149
И.А. СОРОКИН, Ф.С. ПОДОЛЯКО ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА МЕЖДУ ПЛАЗМОЙ И ВЫСОКОЭМИССИОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....	150
В.В. КУЗЕНОВ, П.Д. БРОСИН МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ..	151
В.П. АФАНАСЬЕВ, Л.Г. ЛОБАНОВА АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА МЕТОДОМ ИНВАРИАНТНОГО ПОГРУЖЕНИЯ	152
И.Д. ЖДАНОВ, А.Е. ЕВСИН, Н.О. САВВИН, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ ЗАХВАТ ВОДОРОДА В ЦИРКОНИЕВЫЙ СПЛАВ Э110 ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ.....	153

С.М. МУРОМСКИЙ, А.Е. ЕВСИН, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, А.М. ЗАХАРОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ Fe-Cr-Al В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ СОСТАВА И УСЛОВИЙ ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ НА СТАЛЬ ЭП-823	154
Ж.Б. САГДОЛДИНА, С.А. АБДУЛИНА, К.А. ШЕСТАКОВ, М. МАУЛЕТ ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ФТОРИДА МАГНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ.....	155
Т.Э. ГАЯНОВА, В.Д. СТЕПАХИН, Е.А. ОБРАЗЦОВА, Е.В. ВОРОНОВА, Н.Н. СКВОРЦОВА ПРИМЕНЕНИЕ КАТАЛИЗАТОРА ДЛЯ СИНТЕЗА В ПРОЦЕССАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В СМЕСЯХ ПОРОШКОВ ТИТАНА И НИТРИДА БОРА.....	156
А.К. КУТУКОВ, Д.В. КОВАЛЕНКО, В.А. БАРСУК, С.Е. ПАНИН, А.А. СЕРГЕЕЧЕВ ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИМПУЛЬСНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ.....	157
В.О. ОСКИРКО, И.М. ГОНЧАРЕНКО, А.Н. ЗАХАРОВ, М.И. АЖГИХИН, А.А. СОЛОВЬЕВ КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЖИМ ДУГОВОГО ИСПАРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СУБМИКРОСЕКУНДНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ*	158
М.Б. ШАВЕЛКИНА, И.В. АНТОНОВА, П.П. ИВАНОВ, Р.А. СООТС, Р.Х. АМИРОВ, В.А. КАТАРЖИС ПЛАЗМОСТРУЙНЫЙ СИНТЕЗ ГЕСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА ДЛЯ ГИБКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ .	159
С.Б. ВЕТРОВА, Н.Н. АНТОНОВ, Г.Д. ЛИЗЯКИН, Ю.А. БЫКОВ, А.В. ГАВРИКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ ПЛАЗМЫ БУФЕРНОГО ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В СЕПАРАТОРЕ С ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМОЙ	160
А.П. ОЙЛЕР, Г.Д. ЛИЗЯКИН, А.В. ГАВРИКОВ ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАЗМЕННОЙ МАСС-СЕПАРАЦИИ В АКСИАЛЬНО СИММЕТРИЧНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ПЛАЗМЫ	161
Ю.С. БАРЫШНИКОВ, Р.О. КУРАКИН, К.В. ТВЕРДОХЛЕБОВ, С.А. ПОНЯЕВ ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ НА УСТАНОВКЕ С ЖИДКИМ АНОДОМ ПРИ МАЛОМОЩНОМ НАГРЕВЕ .	162
Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИ РАЗРЯДЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ	163
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ, А.А. ПОПОВ ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА В КАТОДЕ, НА ФОРМИРОВАНИЕ КАТОДНЫХ ПЯТЕН	164
В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ, А.М. ЖУРАВЛЁВ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ИОНАМИ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	165
И.Х. ХУДАЙКУЛОВ, Б.Р. КАХРАМОНОВ, В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ. ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ КОНТАКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ.....	166
И.Г. ЛЕБО ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ МОЩНЫХ УФ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ МИШЕНЯМИ.....	167
М.А. РОГОЖИНА, Е.Ю. ЗАРУБИНА ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНОГО ПО ТОЛЩИНЕ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ДЕЙТЕРИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ КАК ЭТАП СОЗДАНИЯ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА	168
Е.Ю. ЗАРУБИНА, М.А. РОГОЖИНА ТЕНЕВОЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА	169
Г.А. ВЕРГУНОВА, С.Ю. ГУСЬКОВ, Н.Н. ДЕМЧЕНКО, Е.О. ДМИТРИЕВ, П.А. КУЧУГОВ, Р.А. ЯХИН ВЛИЯНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА.....	170
И.Г. ГРИГОРЬЕВА, А.А. МАКАРОВ, А.Н. КОРФ, П.Ю. НАУМОВ, А.С. САВЁЛОВ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ T_e В ПРОЦЕССЕ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА.....	171

О.А. БАШУТИН, И.Г. ГРИГОРЬЕВА, А.Н. КОРФ, Д.А.ЛЕБЕДЕВ, П.Ю. НАУМОВ, А.С. САВЁЛОВ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, И.В.ЮМАТОВА ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ	172
О.А. БАШУТИН, И.Г. ГРИГОРЬЕВА, А.С. САВЁЛОВ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА	173
В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ, С.А. МАЙОРОВ, Г.Б. РАГИМХАНОВ, З.Р. ХАЛИКОВА ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯД В ГЕЛИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	174
К.И. АЛМАЗОВА, А.А. АМИРОВА, Н.А. ДЕМИРОВ, А.Н. БЕЛОНОГОВ, В.В. БОРОВКОВ, Г.Б. РАГИМХАНОВ, Д.В. ТЕРЕШОНОК, А.А. ТРЕНЬКИН, З.Р. ХАЛИКОВА ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОМЕЖУТКЕ «ОСТРИЕ-ПЛОСКОСТЬ».....	175
Е.Д. КАЗАКОВ, М.Ю. ОРЛОВ, М.И. ПАВЛЕНКО, М.Г. СТРИЖАКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА МНОГОСЛОЙНЫЕ МИШЕНИ.	176
Е.Д. МАРЕНКОВ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Н.Е. ЕФИМОВ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Ю.М. ГАСПАРЯН ДИНАМИКА ИЗЛУЧЕНИЯ САМОПОДОБНО РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ	177
Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, Ю.М. ГАСПАРЯН, Н.Е. ЕФИМОВ, С.А. КРАТ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПО LIBS СПЕКТРАМ ЛИТИЯ	178
А.П. СКРИПНИК, Д.С. СТЕПАНОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ ПОРТАТИВНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ ДИОДОМ.....	179
А.П. СКРИПНИК, Д.С. СТЕПАНОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРТАТИВНОМ НЕЙТРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ С ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ ИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ	180
Д.С. СТЕПАНОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.П. СКРИПНИК, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ СИСТЕМА МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИОННОГО ДИОДА ПОРТАТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ	181
К.Ю. ВАГИН, Т. В. МАМОНТОВА, С.А. УРЮПИН ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ СКИН-ЭФФЕКТ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ, ОБРАЗОВАННОЙ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ	182
И.П. ЕЛИН, Н.В. ЖИДКОВ ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ «ПЕРВИЧНАЯ-ВТОРИЧНАЯ МИШЕНЬ» ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5».....	183
О.А. БАШУТИН, П.П. СИДОРОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ИЗ РАЗРЯДА ТИПА "ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС"	184
Д.Л. КИРКО, П.П. СИДОРОВ, О.А. БАШУТИН, А.С. САВЕЛОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕННОМ ФОКУСЕ.....	185
В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ, Г.Б. РАГИМХАНОВ, Д.В.ТЕРЕШОНОК, П.Х.ОМАРОВА, З.Р. ХАЛИКОВА ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ИОНИЗИРОВАННОМ АРГОНЕ В ПРОМЕЖУТКЕ С ГЕОМЕТРИЕЙ «ОСТРИЕ - ПЛОСКОСТЬ».....	186
К.И. АЛМАЗОВА, А.Н. БЕЛОНОГОВ, В.В. БОРОВКОВ, В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ, П.Х. ОМАРОВА, Г.Б. РАГИМХАНОВ, Д.В. ТЕРЕШОНОК, А.А. ТРЕНЬКИН, З.Р. ХАЛИКОВА УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ В ГЕОМЕТРИИ ПРОМЕЖУТКА «ОСТРИЕ-ПЛОСКОСТЬ».....	187
СЕКЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ.....	188

Б.М. АБДУРАХМАНОВ, М.Ш. КУРБАНОВ, У.М. НУРАЛИЕВ НОВЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА МИКРО И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАНА И МИКРОКРЕМНЕЗЕМА	189
Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ НА КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВТСП КОМПОЗИТОВ	190
А.К. АБИШЕВА, А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ, А.К. АЙМУХАНОВ ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ТРАНСПОРТНОГО СЛОЯ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК.....	191
Ю.В. АГРАФОНОВ, И.С. ПЕТРУШИН, Д.В. ХАЛАИМОВ ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ФРЕДГОЛЬМА ВТОРОГО РОДА ДЛЯ ОДНОЧАСТИЧНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ	192
М.С. АНТИПОВ, А.Д. БАЖИНА, А.С. КОНСТАНТИНОВ, П.М. БАЖИН СВЧ-ЭКСТРУЗИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С КОМПЛЕКСНОЙ СВЯЗКОЙ НИХРОМ, ИХ СВОЙСТВА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ	193
М.Н. АНТОНЮК, К.А. КУПЦОВ, А.Н. ШЕВЕЙКО, Д.В. ШТАНСКИЙ ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ ТАС-FE-CR-MO-NI В МОРСКОЙ ВОДЕ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ФИНИШНОГО DLC СЛОЯ	194
Е.А. АЛДАШ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАГНИТНЫХ СОЛИТОНОВ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ	195
Н.В. АУНГ, М.А. ПУГАЧЕВСКИЙ, А.П. КУЗЬМЕНКО СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК CuO/C В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ	196
Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ, У.Ш. АБДИРАХМОНОВ АНИЗОТРОПИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ LiTaO_3	197
Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ, М.И. ЭЛБОВА ФОТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ МОЛИБДАТА КАЛЬЦИЯ	198
Д.М. БЕЗВЕРХНЯЯ, В.В. ФИЛАТОВ, Д.Р. ЯДРИХИНСКАЯ ФОРМИРОВАНИЕ МУЛЬТИФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКОЙ КОНДЕНСАЦИИ СВЕТА В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ	199
К.А. БОРОДАКО, В.Ю. НОВИЦКИЙ, Т.Ю. ПРОНЧЕНКО, А.В. ШЕЛЯКОВ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ НА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА TiNiCu С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ.....	200
А.А. БУШ, В.И. КОЗЛОВ, В.Г. ТРОЦЕНКО, Е.С. ЖУКОВА, А.Ю. СЕРОВАЙСКИЙ, В.Г. КУЧЕРОВ ОБРАЗЦЫ ФАЗЫ VSCO_3 : ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ, ИНФРАКРАСНОЙ И РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	201
Р.А. ВАХРУШЕВ, А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ ИЗНОСО- И ЖАРОСТОЙКИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ В СИСТЕМЕ Ta-Zr-Si-B-C-N	202
С.В. ВЕСЕЛОВА, Д.А. АБИН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, М.С. НОВИКОВ ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВТСП ЛЕНТ НА ТОКОНЕСУЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ СОЗДАНИИ CORC КАБЕЛЯ	203
Д.М. ВОРОПАЕВ, А.В. ФРОЛОВ, А.П. ОРЛОВ, А.А. СИНЧЕНКО, П. МОНСО СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА РЕЛАКСАЦИИ ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ В ОСНОВНОЕ СОСТОЯНИЕ В СОЕДИНЕНИЯХ HoTe_3 И TbTe_3	204
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ, Р.М. ЭМИРОВ, М.Х. ГАДЖИЕВ, П.М. САЙПУЛАЕВ, М.В. ИЛЬИЧЕВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ BiFeO_3 ДО И ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ АРГОНА	205
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, П.М. САЙПУЛАЕВ, Р.М. ЭМИРОВ, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ, А.Э. РАБАДАНОВА ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА РАЗМЕР КРИСТАЛЛИТОВ В НАНОПОРОШКЕ BaZrO_3	206

Ф.Ф. ГАЛИЕВ, А.Ю. МАЛАХОВ, И.В. ДЕНИСОВ, С.А. СЕРОПЯН ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ЭКСТРУЗИЯ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ NI-AL	207
А.А. ГАРМАТИНА, А.В. ЛАЗАРЕВ, Д.Н. ТРУБНИКОВ, А.Г. ШУБНЫЙ, Н.В. МИНАЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО ПОЛУЧЕНИЕ И ДИАГНОСТИКА МИКРОМИЦЕЛЛС ПОЛЯРНЫМ ЯДРОМ D ₂ O В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ CO ₂ РЕАКТОРЕ	208
К.С. ГРИШАКОВ, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО НОВЫЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ ТВЕРДЫЕ АТОМАРНЫЕ ФАЗЫ АЗОТА	209
Д.С. ДАЙБАГЕ, А.В. ОСАДЧЕНКО, И.А. ЗАХАРЧУК, С.А. АМБРОЗЕВИЧ, А.С. СЕЛЮКОВ, Е.К. ЗАХАРОВА, А.С. ПЕРЕПЕЛИЦА, М.С. СМИРНОВ, О.В. ОВЧИННИКОВ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК AG ₂ S ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ...	210
А.Ю. ДЕГТЯРЕНКО, В.А. ВЛАСЕНКО, А.В. ОВЧАРОВ, И.А. КАРАТЕЕВ, К.С. ПЕРВАКОВ МИКРОСТРУКТУРА МАГНИТНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА EU-1144	211
П.Н. ДЕГТЯРЕНКО, В.В. ЖЕЛТОВ, Н.Н. БАЛАШОВ, А.Ю. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, А.Ю. ДЕГТЯРЕНКО, К.Л. КОВАЛЕВ МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЯХ ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВТСП ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ.....	212
П.Н. ДЕГТЯРЕНКО, В.В. ЖЕЛТОВ, Н.Н. БАЛАШОВ, А.Ю. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, А.Ю. ДЕГТЯРЕНКО, К.Л. КОВАЛЕВ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ВТСП КАБЕЛЯХ С ВЫСОКОЙ ТОКОНЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ СОДЕРЖАЩИХ ВСП-ПРЕДОХРАНИТЕЛЬ	213
А.М. ДЕНЬГОВА, О.Л. ФЁДОРОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССОВ СУХОГО ТРЕНИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ	214
А.И. ДМИТРИЕВ, А.В. КОЧУРА, А.П. КУЗЬМЕНКО, О.А. НОВОДВОРСКИЙ, О.Д. ХРАМОВА, Л.С. ПАРШИНА, А.Л. ВАСИЛЬЕВ, Б.А. АРОНЗОН ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРМООБРАБОТКОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПЛЕНОК GAMNSV, ПОЛУЧЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ...	215
Х.И. ЖАББОРОВ, И.Д. ЯДГАРОВ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ ВОДОРОДА С ГРАФЕНОМ	216
А.А. ЗАРИПОВ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ	217
А.А. ЗАСЫПКИНА, М.В. СИНЯКОВ, Д.Д. СПАСОВ, Р.М. МЕНШАРАПОВ, Н.А. ИВАНОВА, О.К. АЛЕКСЕЕВА АНТИКОРРОЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ТИТАНА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ПОМОЩИ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ	218
Д.С. КАМБАР, Т.Е. СЕЙСЕМБЕКОВА, С.К. ТАЖИБАЕВ, Т.М. МУКАМЕТКАЛИ, А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНОГО ФОТОЭЛЕКТРОДА ZNO:SNO ₂	219
А. КАРАДЖИЧ, В.В. ФИЛАТОВ ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ COVID-19 НА ОСНОВЕ ГИПЕРКОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ПОЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ИНКАПСУЛИРОВАННОЙ РНК SARS-COV-2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ ПОДЛОЖКИ	220
В.А. КАСЬЯНЕНКО, Р.И. РОМАНОВ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК WS ₂ /C	221
И.О. КЕССЛЕР, В.В. НИФТАЛИЕВА, Ю.В. МОРОЗОВА, В.С. КЛИМИН ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАНОРАЗМЕРНОГО МИКРОПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК SI С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ВО ФТОРИДНОЙ ПЛАЗМЕ	222
Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Д. СЫТЧЕНКО, Р.А. ВАХРУШЕВ, П.А. ЛОГИНОВ, А.С. ОРЕХОВ, Е.А. ЛЕВАШОВ СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОХОДЯЩИЕ В НАНОПЛЕНКАХ MOZRHfYSiB ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ	223

А.Н. КИРЯКОВ, А.Ф.ЗАЦЕПИН, Т.В. ДЬЯЧКОВА, А.П. ТЮТЮННИК ТЕРМОБАРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГРАФЕНОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В НАНОКЕРАМИКЕ $MgAl_2O_4$	224
О.В. КОПЛАК, Е.В. ДВОРЕЦКАЯ, Р.Б. МОРГУНОВ ЛОКАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МИКРОПРОВОДОВ PRDYFCOSV.....	225
В.О. КОПЫТСКИЙ, Е.В. ПЕТРОВ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ МЕТАНИЯ ПЛАСТИНЫ-УДАРНИКА РАЗОГНАННОЙ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА.....	226
В.Р. КРИПАК, Н.А. ЩЕРБИНА, А.В. ВАЛЬКОВ, Н.А. ОНОПРИЕНКО ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЗМ ИЗ ФГ.....	227
М.Ш. КУРБАНОВ, У.М. НУРАЛИЕВ, Ж.А. ПАНЖИЕВ, С.А. ТУЛАГАНОВ, М. ЭРНАЗАРОВ СВОЙСТВА АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ.....	228
А.В. КУРИЛОВА, К.А. МАЛЕЕВА, И.Е. КАЛИЯ, А.Ю. ДУБОВИК ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА СПЕКТРЫ ГИПЕРУСИЛЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ.....	229
А.Е. ЛУКЪЯНОВ, И.А. КОВАЛЕВ, В.Д. НЕВЕРОВ, А.В. КРАСАВИН, Я.В. ЖУМАГУЛОВ, Д. КОЧАН ХАББАРДОВСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ ОТ ДЫШАЩЕЙ МОДЫ В $VAIO_3$	230
А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, В.А. КАШУРНИКОВ УПОРЯДОЧЕННЫЕ ВИХРЕВЫЕ КОНФИГУРАЦИИ В ВТСП-ПЛЕНКЕ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ МАССИВОМ СУБМИКРОННЫХ МАГНИТНЫХ ТОЧЕК НА ПОВЕРХНОСТИ.....	231
А.Ю. МАЛЯВИНА, П.Ф. КАРЦЕВ СВЕРХБЫСТРАЯ КИНЕТИКА ЭКСИТОНОВ В МЕЛКОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЕ.....	232
В.А. МАМОНТОВ, А.Ю. РЫЖЕНКОВА, М.А. ПУГАЧЕВСКИЙ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АБЛИРОВАННЫХ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ.....	233
И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, М.С. НОВИКОВ, И.А. РУДНЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ И ПОТЕРЬ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ CORC-КАБЕЛЕ.....	234
И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, С.А. КРАТ, И.А. РУДНЕВ РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА.....	235
М.М. МАРТЪЯНОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ ВИХРЕВАЯ РЕШЕТКА СЛОИСТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	236
Б.И. МАССАЛИМОВ, О.А. СОБОЛЕВСКИЙ, А.В. САДАКОВ, П.Н. ДЕГТЯРЕНКО ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННОГО 2GHTS-ПРОВОДА С РАЗЛИЧНОЙ СТЕХИОМЕТРИЕЙ СОСТАВА НА ОСНОВЕ GD В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ.....	237
А.В. МАТАСОВ, А.А. БУШ, В.И. КОЗЛОВ, В.А. АНДРИАНОВ СИНТЕЗ, ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МЕССБАУЭРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗЫ $CUSRO_2$ СО СТРУКТУРОЙ ДЕЛАФОССИТА.....	238
У.К. МАХМАНОВ, Ш. ЭСАНОВ, Б. АСЛОНОВ, О. ДИЁРОВ, О. СИДИГАЛИЕВ, У. ТУРДАЛИЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В РАСТВОРАХ ФУЛЛЕРЕНА C_{60} МЕТОДОМ РЕФРАКТОМЕТРИИ.....	239
У.К. МАХМАНОВ, Ш.А. ЭСАНОВ, О.У. ДИЁРОВ, О. СИДИГАЛИЕВ, У. ТУРДАЛИЕВ СИНТЕЗ НАНОТРУБОК ФУЛЛЕРЕНА C_{70} В ОБЪЕМЕ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ КАПЛИ.....	240
А.А. МИХАЙЛОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, Д.М. ГОХФЕЛЬД ТЕМПЕРАТУРНАЯ И РАЗМЕРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛЯ НЕОБРАТИМОСТИ СЛОИСТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА.....	241
Т.М. МУКАМЕТКАЛИ, С.К. ТАЖИБАЕВ, Д.С. КАМБАР, А.К.ЗЕЙНИДЕНОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК TiO_2	242

Ж.Х. МУРЛИЕВА, М.Э. ИСХАКОВ, Р.М. ЭМИРОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Д.К. ПАЛЧАЕВ ПРИРОДА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ $Ti_{67}Al_{33}$	243
А.К. МУСАБЕКОВА, А.К. ТУСУПБЕКОВА ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ СДО НА ОПТИЧЕСКУЮ ШИРИНУ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПЛЕНКИ ZNO	244
Н.Н. НИЁЗБЕКОВ, И.В. САЙКОВ, А.Ю. МАЛАХОВ, И.В. ДЕНИСОВ ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ ГРАНИЦЫ СОЕДИНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА AMG6-BT1-0-08X18N10T, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ	245
И.В. НИКОЛАЕВ, Н.Г. КОРОБЕЙЩИКОВ ОБРАБОТКА НЕЛИНЕЙНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ ПУЧКОМ АРГОНА	246
П.И. НИКОЛЕНКО, И.В. ЩЕТИНИН, Л.Д. МОГИЛЬНИКОВА, Т.Р. НИЗАМОВ, И.Г. БОРДЮЖИН, И.В. ДОРОФИЕВИЧ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ $SRFe_{12-x}In_xO_{19}$, ПОЛУЧЕННЫХ ЦИТРАТНЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ	247
О.Ю. НИЩАК, И.Ф. НУРИАХМЕТОВ, И.А. ЗАВИДОВСКИЙ, О.А. СТРЕЛЕЦКИЙ SP-СОДЕРЖАЩИЕ ПЛЕНКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ДЕГИДРОГАЛОГЕНИРОВАНИЯ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА, КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕЗИСТИВНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ	248
М.Т. НОРМУРАДОВ, А.С. РЫСБАЕВ, Д.А. НОРМУРОДОВ, К.Т. ДОВРАНОВ, Х.Т. ДАВРАНОВ СОСТАВ И ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ $BaSi_2$, СОЗДАНЫХ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ SI	249
Г.С. НУЖДОВ, В.Н. АВДИЕВИЧ, С.З. МИРЗАЕВ, Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА МИГРАЦИЮ ВАКАНСИЙ В КРИСТАЛЛАХ LaF_3	250
С.А. НУРЕТДИНОВ ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДАМИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ ПЛАЗМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА, ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	251
Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, М.Ш. КУРБАНОВ, С.Е. МАКСИМОВ, Н.Н. НИКИФОРОВА К ВОПРОСУ О КОМБИНИРОВАННЫХ (2D/3D) - ОБЪЕКТАХ И ИХ СВОЙСТВАХ	252
Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ, Н.Н. НИКИФОРОВА, А.Ф. ЗАЦЕПИН, Н.А. КУЛАГИНА РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЛОЖНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ РАДИАЦИЕЙ С ШИРОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ	253
Г.И. ОМАРБЕКОВА, А.М. ЖАКАНОВА, А.М. МУХАМЕДЖАНОВА ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКУЮ ШИРИНУ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ	254
Н.А. ОНОПРИЕНКО, А.В. ВАЛЬКОВ, Н.А. ЩЕРБИНА, В.Р. КРИПАК ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЗМ ИЗ ФГ	255
Д.К. ПАЛЧАЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, А.Э. РАБАДАНОВА, Ж.Х. МУРЛИЕВА, М.Х. РАБАДАНОВ ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ НАНОКЕРАМИКИ $YBCO$	256
А.О. ПИВЕНЬ, Д.Д. ДАРМОРОЗ, Т. ОРЛОВА СОЗДАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СТРУКТУР В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХИРАЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ	257
А.Г. ПУТИЛОВ, А.Е. ШЕПЕЛЕВ, К.М. СТАНКЕВИЧ, И.И. ПРИВОДНОВ, А.А. АНТИПОВ ПОЛУЧЕНИЕ МЕДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ С ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ	258
А.Э. РАБАДАНОВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА ВОЗМОЖНОСТЬ ДОНАСЫЩЕНИЯ КИСЛОРОДОМ МОНОДОМЕННЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ $YBCO$	259
Х. РАХИМОВ, И. ЖУРАЕВ, С.М. МИРЗАЕВ, У. ХАЛИЛОВ ДИНАМИКА ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ГРАФЕНОВЫХ ДИОДАХ	260
К.С. РОЖКОВА, А.А. КАЛИ, А.К. АЙМУХАНОВ ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ PEDOT:PSS НА ЕГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА	261
Д.А. РОДИОНОВ, И.В. ЗАГОРОДНЕВ ПЛАЗМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ДИСКЕ	262

О.В. РУБИНКОВСКАЯ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ НАНОПЛЕНОК СУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА НА ФОТОЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВОГО ФОТОКАТОДА	263
К.Н. РЫКУН, А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, В.А. КАШУРНИКОВ, И.А. РУДНЕВ ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ БАЗИСА В СЛОЖНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ ПИНИНГА НА МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ВТСП.....	264
И.Е. СЕМЕНЧУК, В.А. ЩЕРБАКОВ, А.Н. ГРЯДУНОВ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И КОНСОЛИДАЦИЯ КЕРАМИКИ $Ta_4HfC_5-HfB_2$ С СУБМИКРОННОЙ СТРУКТУРОЙ	265
С.А. СЕРОПЯН, И.В. САЙКОВ, Г.Р. САЙКОВА, Е.И. ВОЛЧЕНКО ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ W-ПТФЭ-AL.....	266
Н.Н. СИТНИКОВ, И.А. ЗАЛЕТОВА, А.В. ШЕЛЯКОВ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА БЫСТРОЗАКАЛЁННЫХ СЛОИСТЫХ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ ИЗ СПЛАВА $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$	267
И.А. СОРОКИН, Д.В. КОЛОДКО О ВОЗМОЖНОСТИ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГО-ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА	268
В.Г. СРЕДИН, К.С.АНДРЕЙЧИКОВ, В.П. АСТАХОВ, В.Ф. ЧИШКО, Р.Ш. РАМАКОТИ, А.П. МЕЛЕХОВ, А.А. МАКАРОВ ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АНТИМОНИДА ИНДИЯ С АНОДНЫМ ОКИСНЫМ СЛОЕМ.....	269
Д.А. СТАРОДУБЦЕВА ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И СПИНОВОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАНАРНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ.....	270
А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, Р.А. ВАХРУШЕВ, Е.А. ЛЕВАШОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ MO-(HF, ZR, Y)-SI-B.....	271
С.К. ТАЖИБАЕВ, Т.М. МУКАМЕТКАЛИ, Д.С. КАМБАР, А.К.ЗЕЙНИДЕНОВ ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ SPIRO-ОМЕТАДА НА ЕЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	272
М.М. ТАЮПОВ, А.В. МАРКОВА, А.М. САФРОНОВ, К.Ю. ПОГЛАЗОВ МЕТОД МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ РЕЗОНАНСНОГО ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ, КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ.....	273
Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, А.Н. УРОКОВ, Ж. ШЕРМАТОВ, М. ЭРКАБОВЕВ ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ В ПРОЦЕССЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Va^{+}	274
С.Ф. УМАНСКАЯ, М.А. ШЕВЧЕНКО, А.Д. КУДРЯВЦЕВА, М.А. КАРПОВ, Н.В. ЧЕРНЕГА, А.Н. МАРЕСЕВ, К.И. ЗЕМСКОВ ГЕНЕРАЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ТРИБОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ.....	275
Б.Е. УМИРЗАКОВ, Г.Х. АЛЛАЯРОВА, Б. ХУРРАМОВ ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ SI ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ O_2^{+}	276
Б.Е. УМИРЗАКОВ, З.А. ИСАХАНОВ, Р.М. ЁРКУЛОВ, Ж.Ш. СОДИКЖАНОВ, А.Ш. УСМОНКУЛОВ, А.С. ХАЛМАТОВ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ, КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ БАРИЯ	277
Б.Е. УМИРЗАКОВ, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, З.А. ТУРСУНМЕТОВА, С.Т. АБРАЕВА, Ш. ШАМСИЕВ ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОННЫХ ПУЧКОВ Ar^{+} НА СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ GAAS.....	278
А.В. УШАКОВ, И.В. КАРПОВ, Л.Ю. ФЕДОРОВ ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ НАНОЧАСТИЦ NiO.....	279

А.В. ФРОЛОВ, А.П. ОРЛОВ, Д.М. ВОРОПАЕВ, А.А. СИНЧЕНКО, П. МОНСО ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ НЕРАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ В СОЕДИНЕНИЯХ RTE_3 ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ	280
А.В. ФРОЛОВ, А.А. СИНЧЕНКО, П.Д. ГРИГОРЬЕВ, В.Н. ЗВЕРЕВ, П. МОНСО МАГНИТНЫЕ КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ В ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА В КВАЗИДВУМЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ	281
У. ХАЛИЛОВ, К. МЕХМОНОВ, А. ЭРГАШЕВА, Э.К. НЕЙТС СЫРЬЕВО-ЗАВИСИМЫЙ КАТАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ НАНОУГЛЕРОДОВ	282
У. ХАЛИЛОВ, М. ЮСУПОВ, П. НЕМАТОЛЛАХИ, Д. ХУСАНОВА ПРОЦЕССЫ ПРЕНУКЛЕАЦИИ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРИЛЕНА	283
В.Т. ЧАН, А.С. КЛИМОВ ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ МИШЕНИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОЛИПРОПИЛЕНЕ	284
Н.П. ЧЕРЕЗОВ, М.И. АЛЫМОВ ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССЕ СВС-ГИДРИРОВАНИЯ НА МАССОВУЮ ДОЛЮ ВОДОРОДА В ТИТАНОВОЙ ГУБКЕ	285
Н.С. ШАЙТУРА, М.Н. ЛАРИЧЕВ ЧАСТИЦЫ С АЛЮМИНИЕВЫМ ЯДРОМ И ГИДРОКСИДНОЙ ОБОЛОЧКОЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КЕРАМОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ	286
М. ЭРНАЗАРОВ, Х.К.РАШИДОВ, У.М. НУРАЛИЕВ, С.А. ТУЛАГАНОВ ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВ АНГРЕНСКОЙ ТЭС	287
А.Г. ЮРГО ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НАНОЧАСТИЦАМИ	288
И.А. ТЕРЕЩЕНКО, О.В. ТИХОНОВА ОСОБЕННОСТИ ЭКСИТОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСИСТЕМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЧАСТОТНЫХ МОД КВАНТОВОГО ПОЛЯ.....	289
СЕКЦИЯ УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	290
В.С. ДЮБКОВ, Е.Д. ЦЫПЛАКОВ ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ РЕГУЛЯРНОГО СУПЕРПЕРИОДА ДЛЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО СИНХРОТРОНА «СИЛА».....	291
А.Е. АКСЕНТЬЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ДЕКОГЕРЕНЦИИ ПУЧКА ПРИ НЕАДИАБАТИЧНОМ ИЗМЕНЕНИИ ОРИЕНТАЦИИ ОСИ СТАБИЛЬНОГО СПИНА.....	292
С.В. МАЦИЕВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ В ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR*	293
В.С. ДЮБКОВ, С.М. ПОЛОЗОВ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ КОМПТОНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НИЯУ МИФИ.....	294
С.М.ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА В ФОТОПУШКАХ.....	296
Л.Ю. ОВЧИННИКОВА, А.С. КУРИЛИК МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ПО ГЛУБИНЕ В ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ	297
Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е.АКСЕНТЬЕВ, А.А. ЗАВАДЦЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ, А.П. КЛАЧКОВ, Д.А. ЗАВАДЦЕВ, Д.В.ЧУРАНОВ, В.С. ЮЦКЕВИЧ ОСОБЕННОСТИ УСКОРИТЕЛЯ ДЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ	298
А.Р. КАРИМОВ, В.К. БОГДАНОВ, С.А. ТЕРЕХОВ МЕХАНИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ СВЯЗЕЙ В ПРОСТЫХ ЖИДКОСТЯХ	299
А.Р. КАРИМОВ, В.К. БОГДАНОВ, А.В. ПРОКОПЕНКО ДИНАМИКА КОЛЛЕКТИВНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ПОЛИМЕРОВ В СЛАБЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ.....	300
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ, В.И. РАЩИКОВ ОБНОВЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ РАСЧЁТА ИМПЕДАНСА СВЯЗИ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОГО ТРАКТА VEAM IMPEDANCE 2D	301

В.С. ДЮБКОВ КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ И ИОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ	302
Е.Р.ХАБИБУЛЛИНА, В.И. НИКОЛАЕВ, В.С. СКАЧКОВ, Г.Н. КРОПАЧЁВ, Т.В. КУЛЕВОЙ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В КАНАЛЕ НЕВТ ТЯЖЕЛОИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ.....	303
А.В. ЗИЯТДИНОВА, П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.А. МАЛЬШЕВ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, И.В. КИЛЬМЕТОВА МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ИОНОВ ГЕЛИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	304
С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ ОСНОВНЫЕ АРГУМЕНТЫ В ПОЛЬЗУ ПРОХОЖДЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СИНХРОТРОНА	305
А.А. МЕЛЬНИКОВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СПИНОВОЙ ДЕКОГЕРЕНТНОСТИ ПРОТОНОВ НА УСКОРИТЕЛЕ COSY	306
М.В. ВЛАДИМИРОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ ДИФФУЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ОБЕДНЁННОМ ЭЛЕКТРОНАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ СЛОЕ ФОТОКАТОДА	307
К.С. САГАН ИЗУЧЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНЫХ СВЯЗАННЫХ МОД И ЕЕ ПОРОГА В ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR С ПОМОЩЬЮ БИБЛИОТЕКИ RҮNEADTAİL	308
Д.А. ВАШЕТО, И.В. НОВИКОВ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ПРОВОДЯЩЕЙ СТРУКТУРЕ	309
В.В.ПАРАМОНОВ АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ.....	310
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ	311
А.А. КУЛИКОВ, А.О. МОРОЗОВ, А.В. ПРОКОПЕНКО МИКРОВОЛНОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	312
А. А. БАТОВ, Р.А. ЗБРУЕВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КОМПАКТНОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ S-ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА УСТАНОВКИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕРАПИИ.....	313
Р.А. ЗБРУЕВ, А. А. БАТОВ УСТРОЙСТВО ВВОДА МОЩНОСТИ ДЛЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ S-ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА УСТАНОВКИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕРАПИИ	314
М.М. БУЛГАЧЕВА, М.А. ГУСАРОВА ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ПЕТЛИ СВЯЗИ УСТРОЙСТВА ВВОДА МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ Н-ТИПА	315
А.А. ГОРЧАКОВ СИСТЕМА ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ Н-ТИПА.....	316
С.В. БАРАБИН, Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Ю. ЛУКАШИН, П.Р. ЗЕНКЕВИЧ, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННОГО ЕСР ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕППЕР-ПОТ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЭМИТТАНСА.....	317
Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭЦР-ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ	318
Е.Д. ВОВЧЕНКО, О.В. ДЕРЯБОЧКИН, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Р.П. ПЛЕШАКОВА, А.Е. ШИКАНОВ, О.В. ЯКОВЛЕВ ОЦЕНКА ТЕРМОУСТОЙЧИВОСТИ МИШЕНИ ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ ...	319
А.А. МАЛЬШЕВ, А.П. ФЕДИН, А.В. ЗИЯТДИНОВА, В.С.СКАЧКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОСНОВНОГО И ПРОЕКТИРУЕМОГО КАНАЛОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТИПР	320
Н.Ю. САМАРОКОВ МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ.....	321

М.С.ДМИТРИЕВ, М.И.ЖИГАЙЛОВА МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИОННОГО ЭЦР ИСТОЧНИКА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц.....	322
И.В. КИЛЬМЕТОВА, А.В.КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, Ю.Б. СТАСЕВИЧ, А.В. ЗИЯТДИНОВА, П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА ЛЕГКИХ ИОНОВ	323
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, О.А. ИВАНОВ, А.С. КРАСНОВ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ И ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ	324
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА ДЛЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,46 ГГц.....	325
А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОТКАЧКИ КОМПАКТНОГО ЛУЭ	326
В.С. ДЮБКОВ А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ УСЛОВИЙ В КОЛЬЦЕ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	327
И.Ю. БАКЕЕВ, А.А. ЗЕНИН, А.С. КЛИМОВ НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СФОКУСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В УЗКИХ ПРОТЯЖЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБКАХ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ	328
А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ	329
А.А. МОЛИН, С.М. ПОЛОЗОВ, А.В. ПРОКОПЕНКО ЦЕНТР НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	330
Е.Д. КАЗАКОВ, О.С. КОСАРЕВ, Д.Д. МАСЛЕННИКОВ, И.А. ТАРАКАНОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	331
А.А. ДРОЗДОВСКИЙ, С.А. ДРОЗДОВСКИЙ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.В. СКОБЛЯКОВ, В.А. ВОЛКОВ ПРИМЕНЕНИЕ ФИТИРОВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МЕТОДОМ ПОГЛОЩАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ.....	332
В.А. ПОНОМАРЕВ, Е.С. ПЕРМЯКОВА, А.Н. ШЕВЕЙКО, Д.В. ШТАНСКИЙ ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТИ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА	333
А.А. ИСАЕВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.Е. ШИКАНОВ, О.В. ЯКОВЛЕВ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК (УТ) ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРОБНЫМИ ДЕЙТЕРИЕВЫМИ МИШЕНЯМИ НА РАЗБОРНОМ ВАКУУМНОМ СТЕНДЕ.....	334
Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, Г.О. БУЯНОВ, А.В. НЕСТЕРОВИЧ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МОБИЛЬНОГО БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	335
К.В. САФРОНОВ, В.А. ФЛЕГЕНТОВ, Н.Н. ШАМАЕВА, А.С. ТИЩЕНКО, Д.О. ЗАМУРАВЕВ, А.Л. ШАМРАЕВ, С.Ф. КОВАЛЕВА, Н.А. ФЕДОРОВ, С.М. ДУБРОВСКИХ, А.С. ПИЛИПЕНКО, А.С. КУСТОВ, Е.А. ШИБАКОВ, О.Н. ГИЛЁВ РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В МИКРОЭЛЕКТРОННОМ УСТРОЙСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОТОНОВ ЛАЗЕРНОГО УСКОРИТЕЛЯ.....	336
П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, А.А. НИКИТИН, С.В. РОГОЖКИН ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР	337
Н.А. КЛЕОПОВА М.А. КАРПОВ НЕИНВАЗИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВ НА РЕНТГЕНОГРАММАХ	338
А.В. ПРОКОПЕНКО, К.Д. СМЕРНОВ МЕТОДЫ ЭПР-СПЕКТРОСКОПИИ В РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ	339
К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, П.А. ФЕДИН, В.К. СЕМЯЧКИН, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ МИШЕННАЯ КАМЕРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	340

СЕКЦИЯ ФИЗИКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ	341
Ю.А. БОГДАНОВА, Ю.А. УСТЬЯНЦЕВА, М.А. БАСКАКОВ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ	342
Ю.А. БОГДАНОВА, С.А. ГУБИН, А.Д. ТРОФИМОВА, А. А. ЕГОРОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ АДИАБАТ БИНАРНЫХ СПЛАВОВМЕТАЛЛОВ	343
С. В. БОГОМОЛОВ ЛАГРАНЖЕВА СТОХАСТИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ИЕРАРХИЯ.....	344
К. А. БЫРДИН, В. А. СМЕТАНЮК, С. М. ФРОЛОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ	345
П.А. ВЛАСОВ, В.Н. СМИРНОВ, Н.С. МАЛЫШЕВ, Д.И. МИХАЙЛОВ, Г.Л. АГАФОНОВ, В.А. ПОЛЯНСКИЙ, И.Л. ПАНКРАТЬЕВА ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ С ХИМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ СЛИНИЕЙ ЛЕХЕРА И С РУПОРНО-ЛИНЗОВОЙ СИСТЕМАМИ ВВОДА СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ИССЛЕДУЕМУЮ ПЛАЗМУ	346
С.В. ГОРКУНОВ ЭВОЛЮЦИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ.....	347
В.Г. КИРИЛЕНКО, Л.И. ГРИШИН, А.Ю. ДОЛГОБОРОДОВ, М.А. БРАЖНИКОВ, М.Л. КУСКОВ, Г.Е. ВАЛЬЯНО ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ НАНОТЕРМИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОАЛЮМИНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ.....	348
С.А. ГУБИН, А.В. КУДИНОВ, И.В. МАКЛАШОВА ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИКИ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ УЛЬТРА БЫСТРОМ ОХЛАЖДЕНИИ ГАЗА ИЗ АТОМОВ УГЛЕРОДА	349
С.А. ГУБИН, С.Х. ЗАЙНЕТДИНОВ, С.И. СУМСКОЙ О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ НЕДОСЖАТЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН	350
С.И. СУМСКОЙ, С.Х. ЗАЙНЕТДИНОВ, М.В. ЛИСАНОВ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ И ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБАХ	351
М. В. КАЗАЧЕНКО, И. О. ШАМШИН, В. С. АКСЁНОВ, С. М. ФРОЛОВ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ ВОДОРОД-МЕТАН/ЭТИЛЕН/ПРОПАН ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ.....	352
Д.С. КОЛЕСНИКОВ, А.В. СКОБЛЯКОВ, А.В. БОГДАНОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.А. ГОЛУБЕВ, Н.С. ШИЛКИН, В.Б. МИНЦЕВ МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПРОФИЛЯ И ПОЗИЦИИ ПУЧКА ПРИОБРАБОТКЕ ПРОТОННО-РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	353
Г.В. КОЛОМИЙЦЕВ, А.П. ЧУГАЙНОВА, В.А. ШАРГАТОВ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА- БЮРГЕРСА В ВИДЕ БЕГУЩИХ ВОЛН С МОНОТОННОЙ СТРУКТУРОЙ.....	354
С.А. ГУБИН, А.В. КУДИНОВ, И.В. МАКЛАШОВА, М.Ш. КУРБАНОВ, У.М. НУРАЛИЕВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ.....	355
В.Ф. ЛОМАДУРОВ, Т.В. ГУБИНА СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МОДИФИЦИРОВАННОМ НИТРАТЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ	356
С.П. МЕДВЕДЕВ, О.Г. МАКСИМОВА, Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.М. ТЕРЕЗА, С.В. ХОМИК МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ СЛОЕ СМЕСИ ВОДОРОД - ВОЗДУХ.....	357
В.А. ПУШКОВ, Ю.В. БАТЬКОВ РЕАКЦИЯ ВВ НА НИЗКОСКОРОСТНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ.....	358
Т.А. РОСТИЛОВ, В.С. ЗИБОРОВ, А.Ю. ДОЛГОБОРОДОВ, М.Л. КУСКОВ ЭВОЛЮЦИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В НАНОПОРИСТОМ НИКЕЛЕ.....	359
И.А. САДЫКОВ, А.С. СИЛАНТЬЕВ, В.А. СМЕТАНЮК, С.М. ФРОЛОВ ГАЗОВАЯ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННАЯ ШТАМПОВКА	360

Т.А. СЕМЕНОВ, Р.В. ВОЛКОВ, М.С. ДЖИДЖОЕВ, К.А. ИВАНОВ, А.В. ЛАЗАРЕВ, Е.И. МАРЕЕВ, Н.В. МИНАЕВ, И.Н. ЦЫМБАЛОВ, Д.Н. ТРУБНИКОВ, А.Б. САВЕЛЬЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО НЕЙТРОНЫ И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ СУБМИКРОННЫХ АГРЕГАТОВ В СТРУЕ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ СМЕСИ CO ₂ +CD ₃ OD.....	361
К. А. АВДЕЕВ, В. С. АКСЁНОВ, И. А. САДЫКОВ, В. А. СМЕТАНИОК, А. С. СИЛАНТЬЕВ, С. М. ФРОЛОВ, Ф. С. ФРОЛОВ, И. О. ШАМШИН ГАЗИФИКАЦИЯ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ УЛЬТРАПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ	362
А.В. СКОБЛЯКОВ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.А. ГОЛУБЕВ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ.....	363
А.М. ТЕРЕЗА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.С. БЕТЕВ, С.П. МЕДВЕДЕВ, С.В. ХОМИК, Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТОНАЦИОННОГО И ДЕФЛАГРАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА И АВТОМОБИЛЬНЫХ ПИИИ	364
А.О. ХУРЧИЕВ, СКОБЛЯКОВ А.В, ПАНЮШКИН В.А., ГАВРИЛИН Р.О., БОГДАНОВ А.В., КАНЦЫРЕВ А.В., ГОЛУБЕВ А.А. КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ IMAGING PLATES ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ	365
В.А. ШАРГАТОВ ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ В ВИДЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА-БИУРГЕРСА С ПЕРЕМЕННЫМ ПАРАМЕТРОМ ДИССИПАЦИИ	366
В.В. ШЕПЕЛЕВ, Н.А. ИНОГАМОВ, В.В. ЖАХОВСКИЙ, Ю.В. ПЕТРОВ, Е.А. ПЕРОВ, А.Н. ДОЛУДЕНКО ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН, ИНДУЦИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В МЕТАЛЛАХ	367
Н.С. ШИЛКИН, Д.С. ЮРЬЕВ, В.Б. МИНЦЕВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ, А.В. СКОБЛЯКОВ, А.В. БОГДАНОВ, В.А. ПАНЮШКИН, Р.О. ГАВРИЛИН, А.А. ГОЛУБЕВ ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ УДАРНО-СЖАТОЙ ПЛАЗМЫ	368
С.К. АГАФОНОВ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	369
М.С. АДИАМОВ, В.Г. СИМАКОВ, И.Р. ТРУНИН, М.А. ТКАЧЕНКО, Ю.В. БАТЬКОВ РЕГИСТРАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОМ ТИТАНЕ ВТ1-0 И ЕГО СПЛАВЕ ПТЗВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ. СРАВНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ	370
И.О. ШАМШИН, С.М. ФРОЛОВ, В.С. ИВАНОВ, В.С. АКСЕНОВ ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ ЦЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ.....	371
Н.Н. СЕРЕДКИН, К.В. ХИЩЕНКО РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СМЕСЕВЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ УРАН-МОЛИБДЕНОВЫХ, УРАН-НИОБИЕВЫХ, УРАН-РОДИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ	382
СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ	383
И.С. БАТИНА, С.П. МАСЛЕННИКОВ ПРИМЕНЕНИЕ ФАПЧ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ	384
С.Г. БЕЛИЧЕНКО, М.Д. КАРЕТНИКОВ, А.Д. МАЗНИЦИН ЭНЕРГОУГЛОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГАММА-СПЕКТРОВ В УСТРОЙСТВАХ С МЕЧЕНЫМИ НЕЙТРОНАМИ	385
С.В. ГАВРИШ, С.Г. КИРЕЕВ, Д.Н. КУГУШЕВ, С.В. ПУЧНИНА ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КСЕНОНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ	386
А.К. ДУЛАТОВ, Б.Д. ЛЕМЕШКО, Ю.В. МИХАЙЛОВ, И.А. ПРОКУРАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА.....	387
И.А. КАНЬШИН МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ЭКСТРАГИРУЕМОГО ИЗ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА.....	388

С.В. КОЛЕСНИКОВ, А.П. ДЕНИСЕНКО, Н.В. БОЙКО, С.Г. РУДАКОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЙ СЦИНТИЛЛЯТОРОМ $ZNS(AG)^+{}^6LIF$	389
Д.А. КОМАРОВ, Е.П. ЯКУШКИН, Ю.Н. ПАРАМОНОВ, С.В. СУРКОВ РАЗРАБОТКА СВЕРХМОЩНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА S-ДИАПАЗОНА КИУ-278	390
Д.В. ЛУНЕВ, Е.В. РЯБЕВА ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПШЕНИЦЕ.....	391
И.М. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОТУ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	392
С.П. МАСЛЕННИКОВ, П.Г. ВАСИЛЬЕВА ИССЛЕДОВАНИЕ ПАКЕТНО-ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПЕННИНГА.....	393
И.А. ПРОКУРАТОВ, А.К. ДУЛАТОВ, Б.Д. ЛЕМЕШКО, Ю.В. МИХАЙЛОВ СИСТЕМА НА ВСТРЕЧНЫХ ИОННЫХ ПУЧКАХ НА ОСНОВЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	394
С.А. РАДЖАПОВ, Ф.Г. МУЛЛАГАЛИЕВА, Б.С. РАДЖАПОВ, М.А. ЗУФАРОВ РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ И РАДИОМЕТРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	395
О.В. ЧАКИЛЕВ, Е.В. РЯБЕВА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ОБРАЗЦА БОКСИТА	396
М.В.ШАНДРИКОВ, А.А.ЧЕРКАСОВ ПЛАНАРНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД С ЦЕНТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ	397
СЕКЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ.....	398
Н.Н. АРСЕНЬЕВ, А.П. СЕВЕРЮХИН МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГИГАНТСКОГО МОНОПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА В ${}^{48}Ca$	399
А.В. БЕРЕЗИН, А.М. ФЕДОТОВ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВАКУУМА	400
В.И. БОНДАРЕНКО, М.Г.УРИН СВОЙСТВА ГАМОВ-ТЕЛЛЕРОВСКОГО И ЗАРЯДОВООБМЕННЫХ ГИГАНТСКИХ СПИН-МОНОПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ МАГИЧЕСКИХ МАТЕРИНСКИХ ЯДРАХ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.....	401
О.Е. ВАЙС, М.Г. ЛОБОК, В.Ю. БЫЧЕНКОВ ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЦИРКУЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С ТОНКОЙ ФОЛЬГОЙ	402
Н.С. ВОРОНОВА, Л. ДОМИНИЧИ, Д. САНВИТТО ДИНАМИКА ПОЛЯРИТОННОГО ДВОЙНОГО БЛОХОВСКОГО ПУЧКА.....	403
Д.В. ГАВРИЛЕНКО, А.П. ПОТЫЛИЦЫН, А.А. ТИЩЕНКО ОБРАТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ ПУЧКОВ С НАКЛОННЫМ ФРОНТОМ	404
Д.А. ГОЖЕВ, С.Г. БОЧКАРЕВ, М.Г. ЛОБОК, А.В. БРАНТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРО-КАПЕЛЬНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ КОНВЕРСИИ ВО ВЗРЫВНО-УСКОРЕННЫЕ ИОНЫ.	405
М.Л. ГОРЕЛИК, М.Г. УРИН ПРЯМОЙ ОДНОНЕЙТРОННЫЙ РАСПАД ИЗОСКАЛЯРНОГО ГИГАНТСКОГО ДИПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА В СРЕДНЕ-ТЯЖЕЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.....	406
А.М. ГРУДИНИНА, И.Л. КУРБАКОВ, Н.С. ВОРОНОВА ВЛИЯНИЕ ТЕМНЫХ ЭКСИТОНОВ НА СКОРОСТЬ ЗВУКА В ПОЛЯРИТОННЫХ СИСТЕМАХ	407
А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, О.Б. АНДРЕЕВА, Р.В. КОНЕЕВ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ РАССЕЯНИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОНА ГЕЛИЕПОДОБНЫМ АТОМНЫМ ИОНОМ	408

В.А. МАСЛОВА, Н.С. ВОРОНОВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИПОЛЬНЫХ ЭКСИТОНОВ В БИСЛОЯХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	409
С.Е.МУРАВЬЕВ, О.А.РУМЯНЦЕВТОЧНО РЕШАЕМАЯ МОДЕЛЬ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО И ЭКСИТОННОГО ТИПА ПРИ ОТЛИЧНОЙ ОТ НУЛЯ ТЕМПЕРАТУРЕ.....	410
Р.А. ПОТАПОВ, А.А. МИРОНОВ, А.М. ФЕДОТОВ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЮСОВ ФОТОННОГО ПРОПАГАТОРА В ПОСТОЯННОМ СКРЕЩЕННОМ ПОЛЕ В ПУЗЫРЬКОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ.....	411
М.А. РАКИТИНА, С.И. ГЛАЗЫРИН, А.В. БРАНТОВ РАЗЛЕТ МИШЕНИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА.....	412
А.П. СЕВЕРЮХИН МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ШИРИНЫ ДВОЙНОГО ГАММА РАСПАДА КВАДРУПОЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ЯДРА.....	413
Е.С. СОЗИНОВ, А. А. МИРОНОВ, А. М. ФЕДОТОВ УРАВНЕНИЕ ДАЙСОНА-ШВИНГЕРА СКАЛЯРНОЙ КЭД В ПОСТОЯННОМ СКРЕЩЕННОМ ПОЛЕ В РАДУЖНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ.....	414
Е.С. СОЗИНОВ, Л.В. БОРК, Н.Б. МУЖИЧКОВ ИНФРАКРАСНЫЕ СВОЙСТВА АМПЛИТУД РАССЕЙАНИЯ МАССИВНЫХ ЧАСТИЦ В $N=4$ СУМ.....	415
Н.Е. СОЛОНОВИЧ, Н.Н. АРСЕНЬЕВ, А.П. СЕВЕРЮХИН ДИПОЛЬНАЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ И НЕЙТРОННАЯ ШУБА ДВАЖДЫ МАГИЧЕСКИХ ЯДЕР	416
Р.И. ХУСНУТДИНОВ, А.Б. КУКУШКИН ОБОБЩЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА SXV ДЛЯ ВОДОРОДА НА СЛУЧАЙ СМЕСИ ЕГО ИЗОТОПОВ.....	417
К.Е. ГОРОДНИЧЕВ, С.И. ГЛАЗЫРИН, С.Е. КУРАТОВ ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ УСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛАХ АТВУДА	418
С.Е. КУРАТОВ, И.С.МЕНЬШОВ, С.Ю.ИГАШОВ, Д.ШИДЛОВСКИЙ НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КУМУЛЯЦИИ, ИНИЦИИРОВАННЫЙ КВАНТОВЫМИ ОБОЛОЧЕЧНЫМИ ЭФФЕКТАМИ	419
Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ, Д.Б. РОГОЗКИН СЛАБАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВОЛН В АНСАМБЛЕ РЕЗОНАНСНЫХ МИ-ЧАСТИЦ ВБЛИЗИ ТОЧКИ КЕРКЕРА.....	420
СЕКЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ.....	421
Г.А. АГЕЕВ, П.В. БОРИСЮК ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ГРАНИЦЕ SI/SIO ₂ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ.....	422
К.М. БАЛАХНЁВ, О.С. ВАСИЛЬЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПУЧКА НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДОВ, ЗАДАЮЩИХ ОТКЛОНЯЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ..	423
Д.В. БОРТКО, О.С. ВАСИЛЬЕВ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЗАРЯДА В СИСТЕМЕ КЛАСТЕРОВ С ГРАДИЕНТОМ РАЗМЕРОВ	424
Д. С. КРЮЧКОВ, Г. А. ВИШНЯКОВА, К. С. КУДЕЯРОВ, Н. О. ЖАДНОВ, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ К СОЗДАНИЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОМПАКТНОГО ОПОРНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА НА ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЕ.....	425
У. Н. КУРЕЛЬЧУК ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ СПЕКТРОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОБРАТНО РАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ	426
П.М. МАТЯКУБОВА, Б.А. ЖУМАМУРАТОВ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ	427
П.М.МАТЯКУБОВА, Г.Г. БОБОЕВ, М.М.МАХМУДЖОНОВ ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ.....	431

П.М.МАТЯКУБОВА, М.М.МАХМУДЖОНОВ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ WINDOWS УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДОПУСТИМОГО НОРМИ НАЛИЧИЕ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ	435
Ш.М. МАШАРИПОВ, М.А. МАЛЯНОВ, И.Б. АБДУЛМАЖИРОВ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО СТАНДАРТА ISO/IEC 17025:2017 И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСЫ ПО МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ	438
Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А. МИШИН, Д.О. ТРЕГУБОВ, А.А. ГОЛОВИЗИН, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ МАГНИТО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА АТОМОВ ТУЛИЯ В КОМПАКТНОЙ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЕ БЕЗ ЗЕЕМАНОВСКОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРУЕМЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСОВ	442
К.М. САБАКАРЬ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, С.А. ЗИБРОВ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ АЗОТА НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСА КРН В ^{87}Rb	443
БОРИСЮК П.В, ТЕЛЬНОВ Е.Ю, ПРОВОРЧЕНКО Д.И, ТРЕГУБОВ Д.О., ТРИЧЕВ К.К., ЧЕРЕПАНОВ П.А., ТКАЛЯ Е.В., КОЛАЧЕВСКИЙ Н.Н., СТРЕЛКИН С.А. МАССПЕКТРОМЕТРИЯ И ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНОВ Sr^{88+} В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ	444
БОРИСЮК П.В, ТЕЛЬНОВ Е.Ю, ПРОВОРЧЕНКО Д.И, ТРЕГУБОВ Д.О., ТРИЧЕВ К.К., ЧЕРЕПАНОВ П.А., ТКАЛЯ Е.В., КОЛАЧЕВСКИЙ Н.Н., СТРЕЛКИН С.А. МАССПЕКТРОМЕТРИЯ ИОНОВ Th^{232} ВЫСОКОЙ ЗАРЯДНОСТИ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ И СИМПАТИЧЕСКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНОВ Th^{232} $3+$ ИОНАМИ Sr^{+}	447
Д.О. ТРЕГУБОВ, А.А. ГОЛОВИЗИН, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А. МИШИН, К.Ю. ХАБАРОВА, В.Н. СОРОКИН, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО НАПЫЛЕНИЮ АТОМОВ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ РЕШЕТКУ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ.....	449
В.А. ШИЛОВ, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ МЕТОДИКА НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НАНОКЛАСТЕРОВ МЕТАЛЛОВ С ГРАДИЕНТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПО РАЗМЕРАМ.....	450
СЕКЦИЯ СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	451
Д.А. БУЧНЫЙ, В.С. ЛИТВИН, Д.Н. ТРУНОВ, В.Н. МАРЬИН, С.Н. АКСЕНОВ, Р.А. САДЫКОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СЧЕТЧИКА НЕЙТРОНОВ НА БАЗЕ ZNS(AG)/LiF	452
А.В. ГОРЯЧЕВСКИЙ, Л.П. СУХАНОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛИЖАЙШЕГО ОКРУЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОГО ЦЕНТРА В МОЛЕКУЛЕ ГЕМОГЛОБИНА С ПОМОЩЬЮ XANES-СПЕКТРОСКОПИИ.....	453
Ю.Б. БАЗАРОВ, М.А. КАРПОВ, В.В. МАРМЫШЕВ, С.В. БЕЛОВ, А.А. ДЕМИДОВ, А.А. ХРИСТЕНКО РАДИОГРАФИЯ НЕЙТРОННЫМИ ПОТОКАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ ПРОТОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ	454
О.В.КАШУРНИКОВА АНАЛИЗ КАТИОННОЙ СТРУКТУРЫ НАНОПОРОШКОВ $\text{Dy}_2\text{HF}_2\text{O}_7$ С ПОМОЩЬЮ СТРУКТУРЫ ВЕБЕРИТА (НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ EXAFS-СПЕКТРОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО)	455
П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ РАЗВИТИЕ КРОССПЛАТФОРМЕННЫХ ПРОГРАММ С ГРАФИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ	456
Р.М. МЕНШАРАПОВ, Н.А. ИВАНОВА, Д.Д. СПАСОВ, А.А. ЗАСЫПКИНА, Е.А. СЕРЕГИНА, В.Н. ФАТЕЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕМБРАН $\text{NAFION}^{\text{®}}$ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ	457
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, Ф.Э. ДУБЯГО, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, С.Г. РУДАКОВ, Р.Д. СВТОГОРОВ, Е.В. ХРАМОВ, Н.А. КОЛЬШКИН, И.В. ЩЕТИНИН, И.Г. БОРДЮЖИН ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ, ЛОКАЛЬНУЮ И ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ $\text{Ce}^{+3}_{(1-x)}\text{Ce}^{+4}_x\text{CrO}_{(3+x/2)}$	458

В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, Ф.Э. ДУБЯГО, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, Б.Р. ГАЙНАНОВ, С.Г. РУДАКОВ, Р.Д. СВЕТОГОРОВ, Н.А. КОЛЫШКИН, Е.В. ХРАМОВ, Н.В. ОГНЕВСКАЯ, Н.А. ЦАРЕНКО, О.Н. СЕРЕГИНА, И.В. ЩЕТИНИН СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ, ЛОКАЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ХРОМАТОВ $LnCrO_4$	459
А.А. СЕРЕГИН, О.В. ЧЕРНЫШЕВА, А.В. ШЕЛЯКОВ, Н.Н. СИТНИКОВ, К.А. БОРОДАКО ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СПЛАВОВ $TiNiCu$ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МАРТЕНСИТНОЙ И АУСТЕНИТНОЙ ФАЗАХ	460
У.Б. ШАРОПОВ ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОЧИЩЕННОГО КРЕМНИЯ	461
Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ, М.И. ЭЛБОЕВА ФОТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ МОЛИБДАТА КАЛЬЦИЯ	462
А.В. ВИНОГРАДОВА, И.А. БАЗУЛИН, А.В.ЛУБЕНЧЕНКО, К.А. РОГОЗИН, А.А. КОНЬКОВ, А.С. МЯЗИН ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНОК НИОБИЯ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И СПЕКТРОСКОПИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ	463

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

Х. БАРХУМ, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, А.С. ШИШКИНА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ПРООБРАЗОВ МИКРОКАНАЛОВ ВНУТРИ СТЕКЛА

Развивающееся значение микрофлюидики делает крайне важным исследовать методы, которые оптимизируют ее применение в биологических и химических областях. Мы предлагаем способ изготовления объемных микроканалов в стекле (DV-1) для создания области прохождения микрофлюидики, что позволяет контролировать ее течение и повышать точность процесса. Показаны параметры, которые использовались для процесса изготовления.

K. BARHOUM, R.A. ZAKOLDAEV, A.S. SHISHKINA

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

FEMTOSECOND LASER FABRICATION OF MICROCHANNEL PROTOTYPE INSIDE GLASS

The increasing importance of microfluidics makes it crucial to investigate methods that optimize its applications in biological and chemical fields. We propose a fabrication method of microchannels inside glass (DV-1), which consists of two steps. which helps control its flow and increase the accuracy of the process. The parameters that were used for the fabrication process are shown.

Numerous methods are used to fabricate micro-components for microfluidics to facilitate and control its usage in many fields, such as lithography and wet etching. These techniques can help create microchannels in substrates which can control the microfluidics flow. Although these methods are widely used, they have some disadvantages (shrinkage, stress in the material, etc.) [1]. Laser techniques based on ultrashort laser pulses present a promising way for fast and controllable fabrication of microchannels inside glass [2].

Direct laser writing allows the creation of precise micro-components with different dimensions and geometries inside glass for microfluidics. To optimize the process of fabricating microchannels ultrashort laser pulses can be used, so a femtosecond laser: ytterbium fiber femtosecond laser (Avesta, Antaus-20W-20u/1M) was used for this work, with objective 20x, NA 0.4. Frequencies of 200kHz and 500kHz were used for two different sets of channels fabricated 200 μ m under the surface of the glass. The resulting channels had dimensions (2-19 μ m). Subsequent ultrasonic cleaning in water was performed resulting in hollow channel formation. And a last step of chemical etching in potassium hydroxyl was done to realize the shape of the channels and give porous properties for the glass.

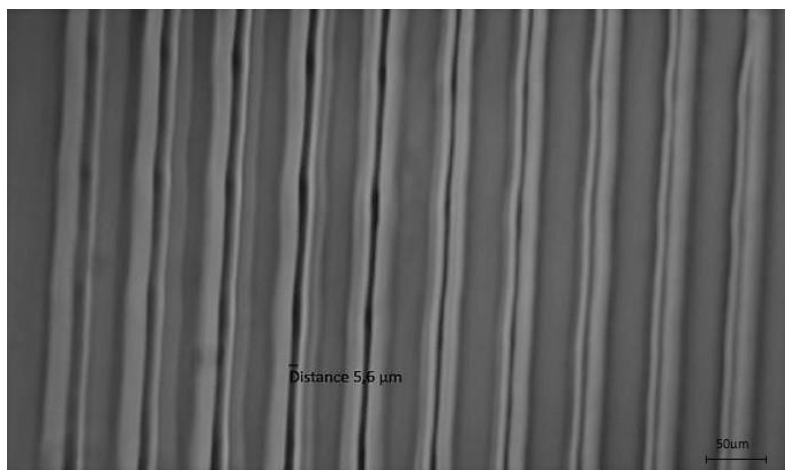


Fig. 1. Microphotos of microchannel prototype inside DV-1 glass

Список литературы

1. Prakash S., Kumar S. //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2015. V. 229, №. 8. P. 1273-1288.
2. Jipa F. et al. Picosecond laser processing of photosensitive glass for generation of biologically relevant microenvironments // Applied Sciences (Switzerland). MDPI AG, 2020. Vol. 10, № 24. P. 1–17.

АНИЗОТРОПИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ LiTaO₃

Методом Брэгговской дифракции света на звуке исследована анизотропия коэффициента акустооптического качества в кристаллах танталата лития в зависимости от направления волнового вектора света в плоскости, перпендикулярной направлению распространения акустической волны. Показано, что можно воздействовать на величину M_2 и управлять эффективностью Брэгговской дифракции света, изменяя направление волнового вектора падающего света.

F.R. AKHMEDZHANOV, U.SH. ABDIRAKHMONOV

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies. U.A. Arifova AS RUz. Tashkent, Uzbekistan

ANISOTROPY OF ACOUSTOOPTICAL INTERACTION IN LiTaO₃ CRYSTALS

The anisotropy of the acoustooptical quality factor in lithium tantalate crystals was studied by the method of Bragg diffraction of light by sound as a function of the direction of the light wave vector in the plane perpendicular to the direction of acoustic wave propagation. It is shown that it is possible to influence the value of M_2 and control the efficiency of the Bragg diffraction of light by changing the direction of the wave vector of the incident light.

Основной целью исследования является определение геометрии наиболее эффективного акустооптического взаимодействия акустических и оптических волн. Эксперименты проводились на образцах танталата лития, ориентированных вдоль кристаллографических осей [100] и [001] методом Диксона в режиме Брэгговской дифракции света на акустических волнах с частотами 400–1200 МГц, которые возбуждались кварцевыми преобразователями X- или Y-среза [1, 2]. Источником света служил гелий-неоновый лазер ($\lambda_0=632,8$ нм). Направление поляризации падающего на образец светового луча относительно волнового вектора и поляризации акустической волны определялись помощью анализатора поляризации.

На основе измеренных интенсивностей дифрагированного света в образцах танталата лития для различных направлений и поляризаций света и акустической волны рассчитаны эффективные фотоупругие константы $p_{эфф}$ и коэффициент акустооптического качества M_2 . В частности, изучено влияние ориентации волнового вектора света в этих кристаллах на коэффициент акустооптического качества M_2 [2]:

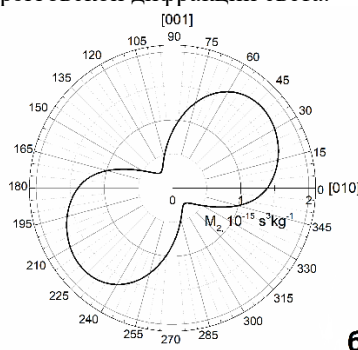
$$M_2 = \frac{n_1^3 n_2^3 p_{эфф}^2}{\rho V^3} \quad (1)$$

где n_1 и n_2 - коэффициенты преломления падающего и дифрагированного света, соответственно, ρ - плотность, V - скорость акустической волны.

Эффективная фотоупругая постоянная, $p_{эфф}$ в соотношении (1) является сверткой фотоупругого тензора p_{ijkl} по векторам поляризации дифрагированного и падающего света α и β , и направления и поляризации звука γ и k [3]:

$$p_{эфф} = p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k k_l \quad (2)$$

Результаты исследования представлены на рисунке 1. Видно, что, изменяя направление волнового вектора падающего света относительно волнового вектора и поляризации акустической волны, можно воздействовать на величину M_2 и, в конечном итоге, управлять эффективностью Брэгговской дифракции света.



6

Рис. 1. Зависимость коэффициента акустооптического качества M_2 в кристаллах LiTaO₃ от направления волнового вектора света, в плоскости (100), при дифракции на продольных акустических волнах вдоль [100]

Список литературы

1. A. Erba, R. Dovesi. Photoelasticity of crystals from theoretical simulations. Phys. Rev, Vol. B88, 2013, pp. 045121.
2. R.W. Dixon, M.G. Cohen. A new technique for measuring magnitudes of Photoelastic Tensors and its Application to Lithium Niobate. Appl. Phys. Letter, Vol. 8, 1966, pp. 205-207.
3. F. R. Akhmedzhanov, U. Sh. Abdirakhmonov and V. N. Avdievich. Anisotropy of Acoustooptical Properties of Lithium Niobate. Crystals Sensors & Transducers, Vol. 254, Issue 7, 2021, pp. 43-46

Е.А. АВИЛОВА¹, Е.А. ЕЛТЫШЕВА¹, Д.А. СИНЕВ¹, В.П. ВЕЙКО¹,
А.Ю. ШИШОВ², Е.М. ХАЙРУЛИНА², И.И. ТУМКИН²

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

УПРАВЛЯЕМОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ В СРЕДЕ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ

В настоящей работе изучено формирование проводящих медных структур на диэлектрической подложке методом лазерно-индуцированного осаждения в среде глубоких эвтектических растворителей. Определены режимы наносекундного импульсно-го воздействия лазерного излучения ближнего ИК-диапазона, способствующие формированию металлических структур. Изучены зависимости формирования структур, их геометрические характеристики и элементный состав.

E.A. AVILOVA¹, E.A. ELTYSHEVA¹, D.A. SINEV¹, V.P. VEIKO¹, A.Yu. SHISHOV², E.M. KHAIRULLINA², I.I. TUMKIN²

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

CONTROLLED FORMATION OF MICROSTRUCTURES BY THE METHOD OF LASER-INDUCED DEPOSITION FROM EUTECTIC SOLVENTS

In this work, we study the formation of conducting copper structures on a dielectric substrate by laser-induced deposition in deep eu-tectic solvents. The modes of nanosecond pulsed action of laser radiation in the near-IR range, which promote the formation of metal structures, are determined. The dependences of the formation of structures, their geometric characteristics, and elemental composition have been studied.

Метод лазерно-индуцированного осаждения металлов из растворов позволяет создавать прототипы структур с электропроводящими характеристиками на подложках произвольной формы и состава. Его использование перспективно в создании гибкой электроники, не требует большого количества расходных материалов и экономичен с точки зрения используемых компонентов [1,2]. Существующие на данный момент подходы, однако, характеризуются малыми скоростями производства (порядка 0.01 мм/с) [1,2]. Недостаточностью является и точность записи, что затрудняет использование структур в оптическом приборостроении, а сами технологические процессы в настоящий момент представлены в рамках лабораторного, а не промышленного лазерного оборудования.

В настоящей работе для реализации метода была использована система МиниМаркер 2 на базе импульсного итербиевого волоконного лазера ($\lambda = 1070$ нм). Оптимальные параметры обработки были подобраны через варьирование регулируемых параметров лазерного воздействия, а также предварительным структурированием поверхности акцепторной подложки методом лазерно-индуцированной микроплазмы [3]. Характеристики полученных структур изучены с применением методов оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, а также энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

В настоящей работе впервые показана возможность повышения эффективности обработки за счет предварительного микроструктурирования поверхности акцепторной подложки. Предложено использование вспомогательного стекла для стабилизации процесса записи за счет поверхностного натяжения растворителя. Изучены процессы формирования лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур на поверхности сформированных треков и возможности их функционализации. Полученные структуры имеют высокую адгезию к поверхности и характеризуются высоким содержанием меди (от 70% до 98%). Форма и размеры структур, доступных для нанесения, ограничены только областью обработки, а производительность обработки увеличена до 2–3 мм/с, что повышает востребованность метода для создания элементов микроэлектроники.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФ (грант 21-79-10241). И.Т. и Е.Х. благодарят РФФИ за финансовую поддержку (номер гранта 20-33-70277). Е.А.А. и Е.А.Е. благодарят Физико-технический факультет Университета ИТМО за поддержку научных и исследовательских проектов студентов в рамках гранта НИРМА. Коллектив авторов благодарит Научный парк СПбГУ, а именно Междисциплинарный ресурсный центр по направлению "Нанотехнологии", ресурсные центры "Рентгенодифракционные методы исследования" и "Оптические и лазерные методы исследования вещества".

Список литературы

1. Shishov, A., Gordeychuk, D., Logunov, L., & Tumkin, I. (2019). High rate laser deposition of conductive copper microstructures from deep eutectic solvents. *Chemical Communications*.
2. Cai, Z., Zeng, X., & Liu, J. (2010). Laser Direct Writing of Conductive Silver Film on Polyimide Surface from Decomposition of Organometallic Ink. *Journal of Electronic Materials*, 40(3), 301–305.
3. Shkuratova V.A., et al. Rapid fabrication of spiral phase plate on fused silica by laser-induced microplasma//*Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2020, Vol. 126, No. 4, pp. 61.

А.Г. АНИСОВИЧ¹, М.И. МАРКЕВИЧ², В.И. ЖУРАВЛЕВА³, Д.Ж. АСАНОВ⁴

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

³Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

⁴Нукусский государственный педагогический институт им. Ажинияза

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ В ВОДНОЙ СРЕДЕ ИЗ МИШЕНИ СИЛУМИНА

Исследована морфология конгломератов наночастиц, полученных в процессе абляции мишени силумина в водной среде излучением лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса ~ 0,05 Дж). Показано, что в процессе лазерной абляции происходит распад сплава и формируется набор наночастиц Al и Si различного размера

A.G. ANISOVICH¹, M.I. MARKEVICH², V.I. ZHURAVLEVA³, D.ZH. ASANOV⁴

¹Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Physico-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

⁴Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz

FORMATION OF NANOPARTICLES IN AQUEOUS ENVIRONMENT FROM A SILUMIN TARGET

Abstract—The morphology of nanoparticle conglomerates obtained by ablation of a silumin target in an aqueous medium by a 1064-nm yttrium aluminum garnet laser (LS-2134D) emitting in a two-pulse mode (pulses separated by a time interval of 3 μ s, pulse duration 10 ns, pulse repetition rate) has been studied. 10 Hz, energy of a single pulse ~0.05 J). It is shown that during laser ablation, the alloy decomposes and a set of Al and Si nanoparticles of various sizes is formed.

Наночастицы и устройства на их основе в настоящее время широко используются в устройствах биосенсорики, транспортировки лекарственных средств в организм человека, нанооптики и др. Так наночастицы металлов используются для создания функциональных поверхностей благодаря явлению плазмонного резонанса. Следует отметить, что лазерная абляция (ЛА) в жидких средах массивных и пленочных мишеней является важным методом получения наночастиц (отсутствие загрязнений и побочных продуктов химических реакций). Для разработки современных технологий с участием наночастиц различных материалов необходимо развитие представлений о процессах, происходящих при взаимодействии лазерного излучения с твердым телом [1-3]. Цель данной работы состояла в экспериментальном исследовании морфологии поверхности конгломератов наночастиц и отдельных составляющих при лазерной абляции мишени из силумина в воде.

В качестве мишени использовали поликристаллический силумин, а в качестве среды, в которой находилась мишень, применяли дистиллированную воду. Жидкость принудительно не перемешивали. Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса ~0,05 Дж). Образованная в результате испарения материала мишени под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц воздуха, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции. Образец обрабатывали лазерным излучением в интервале энергий 900 - 1800 Дж при временах экспозиции от 15 до 30 мин. Исследования образцов проводились на растровом электронном микроскопе MIRA-3. В результате проведенных исследований установлено, что в процессе лазерной абляции происходит формирование частиц алюминия и кремния, формируется набор наночастиц различного размера. Изучена морфология конгломератов из наночастиц, которые имеют размер от 300 нм до 400 нм по длине и состоят из наночастиц сферической формы в диаметре от 10 до 50 нм.

Список литературы

1. Risha, G.A. Combustion of frozen nanoaluminium and water mixtures /G.A. Risha, T.L. Connel, R.A. Yetter, D.S. Sundaram, V. Yang // J. Propul. Power.-2014. -V.30.-N1.- P.133-142.
2. Ионин, А.А. Абляция поверхностей материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов / А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Самохин // УФН.- 2017.- т. 187.- №2.- С.159-172.
3. 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, С60 - 63.

Н.А. АФАНАСЬЕВ, Е.В. ПРОКОФЬЕВ, М.К. МОСКВИН, Г.В. ОДИНЦОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ЛИППС - ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДУЖНЫХ ГОЛОГРАММ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

В работе показан метод создания радужных голограмм на поверхности стали за счет формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) при воздействии лазерного излучения наносекундной длительности с длиной волны 1,06 мкм. Сформированные цветные голографические изображения обладают элементами скрытых структурных элементов, а также движения и динамики.

N.A. AFANASEV, E.V. PROKOFEV, M.K.MOSKVIN, G.V.ODINTSOVA

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

LIPSS - TOOL FOR MANUFACTURING RAINBOW HOLOGRAMS ON METAL SURFACE

The paper discovered the method of rainbow holograms on the surface of steel due to the formation of laser-induced structural ignition processes (LIPSS) under the influence of creating a laser effect of nanosecond duration with a long wave of 1.06 μm . Formed color holographic images of phenomena of movement and dynamics, as well as the phenomena of hidden structural elements.

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) наблюдаются на различных видах материалов [1] и могут стать универсальным способом обработки материалов для формирования микро- и наноструктур, а также для придания поверхности новых функциональных свойств [2,3,4,5]. ЛИППС может действовать как дифракционная решетка для видимого света, и применяться как элемент радужных голограмм. В данной работе предлагается метод создания голограмм путем контроля геометрических параметров структур во время сканирования лазерным излучением поверхности стали. Также данный способ формирования дифракционных элементов дает преимущество в производительности, поскольку позволяет избежать множеств сложных этапов изготовления.

В работе использовалась технологическая установка МинимаркерTM на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера. Средняя выходная мощность лазера: 20 Вт. Длина волны лазерного излучения: 1,064 мкм. Длительность импульсов: 4 - 200 нс. Частота следования импульсов регулируемая: 1,6 кГц до 100 кГц. Фокусировка излучения производилась объективом плоского поля, с фокусным расстоянием 216 мм, в диаметр 50 мкм на уровне $1/e^2$. Для контроля поляризации использовалась дополнительно установленная призма Глана-Тейлора и пластинка $\lambda/4$. В качестве материала формирования радужных голограмм была использована пластина из нержавеющей стали AISI 304 толщиной 0.5 мм.

При помощи многоимпульсного воздействия были записаны структуры периодом 1 мкм. Установлено, что ориентация структур зависит от направления поляризации лазерного излучения, а упорядоченность от эллиптичности поляризации. Таким образом при помощи изменения линейной поляризации лазерного излучения и скорости сканирования был реализован способ записи динамических эффектов. Было продемонстрировано, что с помощью этого метода можно создавать линейные и радиальные паттерны решеток, изменяя ориентацию ЛИППС в соответствии с заданным паттерном. В результате были достигнуты плавные переходы дифрагированного света. При изменении угла наблюдения и угла падения света визуально наблюдаемый цвет также смещался в соседнее местоположение по направлению в соответствии с паттерном ориентации ЛИППС. В результате было достигнуто плавное движение цвета по поверхности. При переходе от линейной поляризации к круговой, по мере увеличения эллиптичности, происходит уменьшение упорядоченности структур, проявляющееся в появлении ветвлений структур и перехода структуры в полностью хаотическую при круговой поляризации. Несмотря на то, что расположение ветвлений и их количество случайно, оно статистически зависит от эллиптичности поляризации и плотности мощности лазерного излучения, что позволяет использовать данный контроль упорядоченности как дополнительный скрытый элемент защитной голографии.

Список литературы

1. Bonse, Jörn, et al. "Ten Open Questions about Laser-Induced Periodic Surface Structures." *Nanomaterials* 11 (2021): 3326.
2. Gräf, Stephan, et al. "Mechano-responsive colour change of laser-induced periodic surface structures." *Applied Surface Science* 471 (2019): 645-651.
3. Rathmann, L., et al. "Friction and Wear Characterization of LIPSS and TiN/DLC Variants." *Applied Surface Science* (2022): 152654.
4. Kunz, C., Engel, S. et al. "Large-Area Fabrication of Laser-Induced Periodic Surface Structures on Fused Silica Using Thin Gold Layers." *Nanomaterials* (2020): 1187.
5. San-Blas, A.; Martinez-Calderon, M. et al. "Femtosecond laser fabrication of LIPSS-based waveplates on metallic surfac-es." *Appl. Surf. Sci.* (2020): 520.

В.Н. ТИЩЕНКО, А.Г. БЕРЕЗУЦКИЙ, Л.Р. ДМИТРИЕВА, Ю.П. ЗАХАРОВ, И.Б. МИРОШНИЧЕНКО, В.Г. ПОСУХ,
А.А.ЧИБРАНОВ, И.Ф.ШАЙХИСЛАМОВ
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МГД ВОЛНЫ

Резонансное взаимодействие периодических сгустков лазерной плазмы с замагниченной плазмой сопровождается генерацией низкочастотных волн в замагниченной плазме: альфвеновская, медленная магнитозвуковая, вистлерная и струя плазмы сгустков, которые локализованы в магнитной силовой трубке. Волны и струя содержат ~80 % энергии сгустков.

V.N. TISHCHENKO, A.G. BEREZUTSKY, L.R. DMITRIEVA, YU.P. ZAKHAROV,
I.B. MIROSHNICHENKO, V.G. POSUKH, A.A. CHIBRANOV, I.F. SHAYKHISLAMOV
Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

CONVERSION OF LASER RADIATION INTO LOW-FREQUENCY MHD WAVES

The resonant interaction of periodic laser plasma bunches with a magnetized plasma is accompanied by the generation of low-frequency waves in the magnetized plasma: Alfvén, slow magnetosonic, whistler, and bunch plasma jets, which are localized in a magnetic force tube. The waves and the jet contain ~80% of the bunch energy.

В ИЛФ СО РАН предложен метод генерации направленных потоков плазмы и электромагнитного излучения в силовой трубке замагниченной плазмы (далее – фон). При определенном соотношении между параметрами сгустков и фона (резонанс) пучок сгустков генерирует единую квазистационарную волну (КВ), например, крутильную альфвеновскую (АКВ) или, одновременно, несколько типов КВ – АКВ, медленная магнитозвуковая (МКВ), вистлерная низкочастотная и высокочастотная, а также струя плазмы сгустков. На рис. 1 показана АКВ, создаваемая десятью сгустками, действующими в точке $Z=R=0$. АКВ переносит момент импульса вращающейся плазмы фона и сильные магнитные поля, МКВ – продольный импульс сжатой плазмы фона, вистлеры – электромагнитное излучение. Протяженность волн линейно зависит от количества сгустков, а радиус определяется энергией единичного сгустка. Длина КВ много больше длины волны создаваемых одним сгустком с энергией, равной суммарной энергии пучка сгустков.

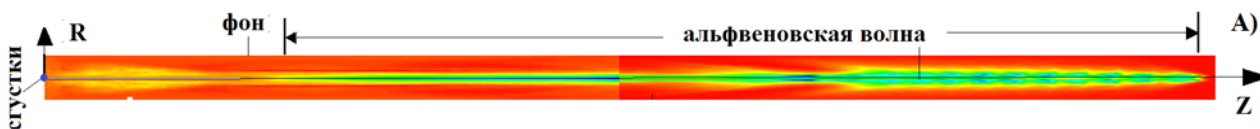


Рис. 1 Момент импульса крутильной альфвеновской волны, АКВ симметрична относительно точки $Z=0$. Расчет.

Условия резонанса позволяют управлять типом, интенсивностью и протяженностью генерируемых волн, а также масштабировать результаты лабораторных экспериментов и расчетов на произвольный фон. При нарушении резонанса энергия сгустков отводится на 4π. Для создания КВ применимы сгустки лазерной плазмы, скорость разлета которых соответствует альфвеновскому числу Маха $M_A \sim 0.2 \div 10$. Для генерации АКВ оптимально $M_A \sim 0.2$ (низкотемпературная плазма ~ 50 эВ), когда АКВ содержит до ~ 50 % энергии сгустков и ее длина максимальна за счет эффекта длительной генерации после прекращения действия сгустков. При $M_A \sim 0.7 \div 1$ одновременно формируются АКВ + МКВ, область $M_A > 2$ – соответствует вистлерам. Струя плазмы сгустков формируется во всем диапазоне значений M_A , и содержит ~ 30 ÷ 50 % энергии сгустков.

Условия резонанса включают шесть безразмерных параметров, что усложняет изучение КВ. В связи с этим основные исследования выполнены с использованием численного моделирования на суперкомпьютерах, результаты подтверждены в экспериментах на стенде КИ-1.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0243-2021-0003. Численное моделирование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН, Московского Государственного университета, Новосибирского государственного университета.

В.П. БИРЮКОВ

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва

ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

В работе рассмотрен процесс лазерной наплавки порошка на основе меди с добавками дисульфида молибдена на образцы стали 40Х с использованием непрерывного излучения и поперечных колебаний луча с частотой 216 Гц. Показано влияние массовой доли дисульфида молибдена на коэффициент трения, сопротивление задиру и изменение интенсивности изнашивания. Изучено влияние поперечных колебаний на производительность наплавки.

V.P. BIRYUKOV

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

EFFECT OF THE MASS FRACTION OF MOLYBDENUM DISULFIDE ON THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF COATINGS DEPOSITED BY A LASER BEAM

The paper considers the process of laser surfacing of copper-based powder with molybdenum disulfide additives on 40Kh steel samples using continuous radiation and transverse beam vibrations with a frequency of 216 Hz. The influence of the mass fraction of molybdenum disulfide on the coefficient of friction, the resistance to bullying and the change in the intensity of wear is shown. The influence of transverse vibrations on the surfacing performance has been studied.

Существуют различные узлы трения, используемые в атомной энергетике и авиационной промышленности, которые работают при высокотемпературной трибологической нагрузке [1]. Применение жидких смазочных материалов в большинстве таких агрегатов невозможно. Для повышения работоспособности поверхностей работающих при высоких температурах возможно использование дисульфидов металлов в качестве твердых смазок или добавок в нанесенные покрытия. Известно, что самосмазывающееся покрытие, NiCr/TiC-Cu-WS₂ на высокомарганцовистой стали (30CrMnSi), полученное методом лазерной наплавки, имеет отличные триботехнические свойства [2]. Однако технологии нанесения самосмазывающихся покрытий с использованием лазерного луча требуют дальнейшей отработки режимов и изучения влияния процентного содержания добавок твердых смазочных материалов с целью изучения их влияния на триботехнические свойства покрытий.

Для проведения экспериментов по наплавке использовали лазерный автоматизированный комплекс ИМАШ РАН. В качестве материала подложки выбрана сталь 40Х. Размеры образцов составляли 15×20×70 мм. Для наплавки использовали порошковый материал на основе меди ПР-БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5 (Бр) с размером частиц 40-150 мкм. Триботехнические испытания проводили на машине трения по схеме плоскость (наплавленный образец после шлифования) – торцевая поверхность втулки (сталь 50ХФА, 50-54HRC). На рис. 1 представлены зависимости изменения давления заедания от скорости скольжения.

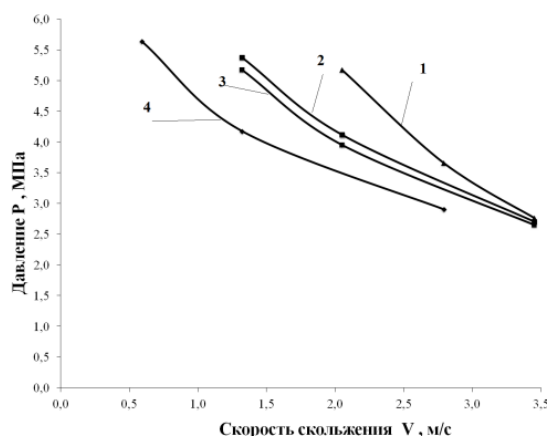


Рис. 1. Зависимость давления заедания от скорости скольжения: 1- Бр+8 % MoS₂, 2- Бр+6% MoS₂, 3 – Бр+10 % MoS₂, 4 – Бр

Из проведенных исследований следует, что наибольшую нагрузку заедания во всем диапазоне скоростей выдерживают образцы с наплавкой медным сплавом Бр, содержащим 8% MoS₂. С увеличением давления коэффициент трения уменьшается, его минимальное значение получено при 10% MoS₂. Минимальная интенсивность изнашивания получена при содержании 8% MoS₂.

Список литературы

1. Quazi, M.M., Fazal, M.A., Haseeb, A.S.M.A. *et al.* A Review to the Laser Cladding of Self-Lubricating Composite Coatings //Lasers Manuf. Mater. Process. 2016. V.3. P. 67–99. <https://doi.org/10.1007/s40516-016-0025-8>.
2. Yuan J.H., Yao Y.G., Zhuang M.X. *et al.* Effects of Cu and WS₂ addition on microstructural evolution and tribological properties of self-lubricating anti-wear coatings prepared by laser cladding // Tribology International.2021. 157. 106872.

В.П. БИРЮКОВ, А.Н. ПРИНЦ, А.А. ЯКУБОВСКИЙ
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва

ПОВЫШЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

В работе рассмотрен процесс лазерной легирования образцов стали 20X13 с использованием непрерывного излучения и поперечных колебаний луча с частотой 218 Гц. Определено влияние легирующих элементов Fe-Co-Cr-Mo и с добавлением нано карбида тантала (TaC)10% на момент трения, нагрузку заедания и износостойкость. Показано, что применение поперечных колебаний луча повышают производительность процесса лазерного легирования поверхности стали.

V.P. BIRYUKOV, A.N. PRINCE, A.A. YAKUBOVSKY
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

INCREASING THE HIGH-TEMPERATURE RESISTANCE AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF THE SURFACE OF STEELS DURING LASER ALLOYING

The paper considers the process of laser alloying of 20Kh13 steel samples using continuous radiation and transverse beam vibrations with a frequency of 218 Hz. The influence of alloying elements Fe-Co-Cr-Mo and with the addition of nano-tantalum carbide (TaC) 10% on the moment of friction, jamming load and wear resistance was determined. It is shown that the use of transverse beam vibrations increases the productivity of the laser alloying process of the steel surface.

Низкоуглеродистая нержавеющая сталь, применяемая в аэрокосмической, атомной, транспортной и других отраслях промышленности, обладает превосходной коррозионной стойкостью, но низкими триботехническими свойствами. Лазерное легирование нержавеющей стали нано карбидом вольфрама (WC) Позволило значительно снизить коэффициент трения по сравнению со сталью SS 316L [1]. Однако эта область остается недостаточно изученной в отношении режимов лазерной обработки и количества вводимых легирующих добавок. Целями настоящих исследований являются повышение коррозионной стойкости при высоких температурах и триботехнических свойств легированных слоев.

Эксперименты по лазерному легированию выполняли на лазерном автоматизированном комплексе ИМАШ РАН. В качестве материала подложки использовали нержавеющую сталь 20X13. Размеры образцов составляли 15×20×70 мм. Для легирования использовали порошковый материал Fe-Co-Cr-Mo применяемый для узлов трения работающих в условиях высокотемпературной коррозии с размером частиц 50-140 мкм и с добавками нано порошка карбида тантала (TaC) 10 масс.% с фракцией 40-100 нм. Шликерные покрытия наносили толщиной 0,3-0,4 мм со связующим веществом на водной основе. Лазерное легирование выполняли при мощности излучения 700-1000 Вт, скорости перемещения луча 3-5 мм/с, диаметром лазерного пятна 1,2-2,2 мм. Окончательную обработку партии образцов выполняли на оптимальных режимах. Перед испытаниями на трение и износ образцы шлифовали. Испытания выполняли на машине трения с использованием схемы плоскость (легированный образец после шлифования) – кольцевая поверхность контрообразца (сталь 40X, 49-54HRC). На рис. 1 представлен микрошлиф легированного образца. Ширина зоны легирования составляла 3,8-4,6 мм при глубине слоя 0.29-0,38 мм.

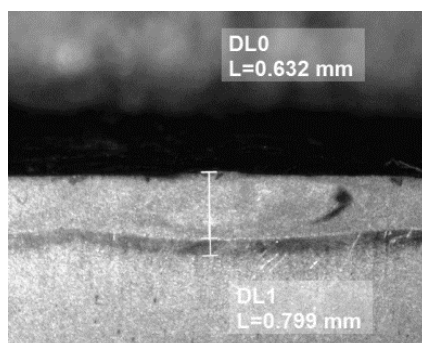


Рис. 1. Микрошлиф легированного образца стали 20X13 порошком Fe-Co-Cr-Mo+10%TaC

Из проведенных испытаний следует, что интенсивность изнашивания материала основы стали 20X13(260-300 HV) составила $5,67 \cdot 10^{-9}$, легированного лазерным лучом с поперечными колебаниями слоя Fe-Co-Cr-Mo (520-552 HV) и Fe-Co-Cr-Mo+10%TaC(560-670 HV) - $3,83 \cdot 10^{-9}$ и $2,75 \cdot 10^{-9}$ соответственно. Минимальный коэффициент трения получен при легировании композиционным материалом с добавкой 10%TaC.

Список литературы

1. Krishnakumari A., Saravanan M., Sarvesh J. Application of Nd: YAG Laser in Nano WC Surface Alloying with Low Carbon Austenitic Steel in Predicting the Microstructure and Hardness // Lasers in Manufacturing and Materials Processing (2021) 8:201–215 <https://doi.org/10.1007/s40516-021-00145-3>.

А.Г. БОНДАРЕНКО, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОКАНАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ СО₂-ЛАЗЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрены зависимости габаритов микроканалов на поверхности кварцевого стекла от параметров излучения СО₂-лазера, а также сформулированы рекомендации для создания микрофлюидных каналов с заданной топологией. Исследовано влияние шероховатости обработанных поверхностей на свойство смачиваемости.

A.G. BONDARENKO, R.A. ZAKOLDAEV
ITMO University, St. Petersburg, Russia

STUDY OF MICROCHANNELS FABRICATION ON GLASS BY CO₂-LASER RADIATION TO CONTROL WETTABILITY

Dependencies of the dimensions of microchannels on the surface of fused silica on the parameters of CO₂ laser radiation are considered, and recommendations for the fabrication of microfluidic channels with a given topology are formulated. The influence of the roughness of the treated surfaces on the wettability properties is investigated.

Лазерное управление микрорельефом поверхности широко распространено для множества материалов при создании микроканалов, наноструктур для управления смачиваемостью поверхности [1]. Высокая оптическая прозрачность, твердость, однородность силикатных материалов являются преимуществом при проектировании микрофлюидного чипа, но в тоже время прецизионная обработка стекла сопровождается рядом трудностей [2]. Механизм резонансного поглощения излучения на SiO₂ матрице инициируется при воздействии на поверхность стекла излучением СО₂-лазера и часто встречается в научных публикациях при абляции силикатных материалов с глубинами кратеров от 5 нм и шероховатостью 3,3 нм [3]. Лазерное воздействие излучением СО₂-лазера является многообещающим, но в тоже время сложным с точки зрения контроля в связи с различными коэффициентами теплового расширения силикатных материалов [4]. В данной работе предложено оптимизировать процесс СО₂-лазерной обработки стекла с целью управления смачиваемостью поверхности, сохраняя однородность и прозрачность материала.

В настоящей работе был предложен метод создания микрофлюидных каналов на поверхности стекла с помощью лазерной установки «С-Marker» (ООО «Лазерный центр») с максимальной выходной мощностью 80 Вт, длиной волны 10,6 мкм, частотой следования импульсов 8 кГц. Запись проводилась на поверхности плавленого кварца. В результате были получены микроканалы на поверхности кварцевого стекла с различной геометрией.

С помощью оптической микроскопии и оптической и контактной профилометрии была выведена зависимость геометрии микроканалов от параметров лазерной обработки. Было продемонстрировано увеличение глубины структур на 1-3 мкм при каждом увеличении мощности на 2 Вт (диапазон мощностей 2-36 Вт). При этом ширина микроканалов также увеличивается до 15 мкм. При максимальной мощности лазерного излучения глубина канала достигает 52 мкм с шириной 200 мкм. Также были проведены исследования с помощью микроскопа со скрещенными поляризаторами для определения структур без внутренних напряжений и дефектов.

Данный метод прямой лазерной записи микроканалов на поверхности стекла дает нам возможность разработать рекомендации по созданию микрофлюидных каналов для коммерческих лазерных источников для различных применений.

Авторы выражают благодарность ООО «Лазерный центр» за предоставление необходимого оборудования для проведения лазерной записи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Ijaola A. O., Bamidele E. A., Akisin C. J., Bello I. T., Oyatobo A. T., Abdulkareem A., Asmatulu E. // Surfaces and Interfaces. 2020. V. 21, № 100802. P. 90.
2. Niculescu A.-G., Chircov C., Bîrcă A. C., Grumezescu A. M. // International Journal of Molecular Sciences. 2021. V. 22, № 2011. P. 26.
3. Temmler A., Weingarten C. B., Schober B., Uluz E. // Applied Surface Science. 2021. V. 555, №149609. P. 16.
4. Collins A. R., Milne D., Prieto, C., O'Connor G. M. // Proc. SPIE. 2015. V. 9351. P. 10.

А.С. БОРИСЕНКО^{1,2,3}, Н.В. СЕМЕНИН^{1,2,3}, И.В. ЗАЛИВАКО^{1,2}, И.А. СЕМЕРИКОВ^{1,2}, К.Ю. ХАБАРОВА^{1,2,3}, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ^{1,2}

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

²Российский Квантовый Центр, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПОВ НАГРЕВА И ТЕМПЕРАТУРЫ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ В ЛИНЕЙНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ МЕТОДОМ ДЕФАЗИРОВКИ ОСЦИЛЛЯЦИЙ РАБИ

Рассмотрен способ измерения температуры вигнеровских ионных кристаллов, основанный на измерении осцилляций Раби между состояниями узкого электронного перехода отдельного иона внутри кристалла. Представлена аналитическая временная зависимость населенности верхнего состояния с учетом теплового распределения по колебательным степеням свободы кристалла с произвольным числом ионов. Экспериментально показана применимость предложенной модели на кристалле из пяти ионов $^{171}\text{Yb}^+$ на квадрупольном переходе 435 нм, а также для одиночного иона, для которого были определены темпы нагрева в ловушке.

A.S. BORISENKO^{1,2,3}, N.V. SEMENIN^{1,2,3}, I.V. ZALIVAKO^{1,2}, I.A. SEMERIKOV^{1,2}, K.YU. KHABAROVA^{1,2,3}, N.N. KOLACHEVSKY^{1,2}

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

²Russian Quantum Center, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Russia

DETERMINATION OF HEATING RATES AND TEMPERATURE OF IONIC CRYSTALS IN A LINEAR PAUL TRAP BY THE RABI OSCILLATION DEPHASING METHOD

Method for determining the temperature of Wigner ionic crystals based on the measurement of Rabi oscillations between the states of a narrow electronic transition of an individual ion inside the crystal is considered. Analytical time dependence of the upper state population is presented taking into account the thermal distribution over the vibrational freedom degrees of a crystal with an arbitrary number of ions. The applicability of the proposed model for a crystal of five $^{171}\text{Yb}^+$ ions at the 435 nm quadrupole transition and for a single ion, for which the heating rates in the trap were determined, was experimentally shown.

Лазерно-охлаждённые ионы в ловушках образуют пространственно упорядоченные структуры - вигнеровские кристаллы - возникающие при балансе между удерживающим полем и кулоновским отталкиванием. В течение последних десятилетий прогресс в приготовлении и контроле внутренними и внешними состояниями ионов в кристалле позволил использовать такие системы, например, в физике плазмы [1], прецизионной спектроскопии [2], квантовых вычислениях [3,4]. В данных экспериментах для достижения высокого уровня контроля состояния иона требуется оценка и минимизация температуры ионов, вычисление темпа нагрева кристалла и его подавление.

В настоящей работе предлагается метод измерения температуры кристалла, основанный на дефазировке резонансных осцилляций Раби на несущей частоте узкого оптического перехода в ионе. Для реализации этого метода необходим один стабилизированный лазерный источник. Аналитическая формула, описывающая населенность верхнего состояния иона, получена из обобщения теории, изложенной в [5], на случай произвольного числа ионов.

Была экспериментально продемонстрирована применимость предложенного метода для оценки темпов нагрева одиночного иона иттербия $^{171}\text{Yb}^+$ в линейной ловушке Пауля и для определения температуры кристалла из 5 ионов. Осцилляции Раби возбуждались на квадрупольном переходе $^2S_{1/2} (F = 0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F = 2)$ с временем жизни верхнего состояния намного больше характерного времени дефазировки. Получена температура ионного кристалла из пяти ионов иттербия $T=1.7\text{мК}$ и темп нагрева в ловушке $dn/dt=7.8 \cdot 10^3$ фононов в секунду. Предложенный метод применим для значений колебательного числа порядка 50-100 и темпах нагрева порядка 10^4 фононов в секунду, что существенно расширяет диапазон поддающихся измерению параметров кристаллов и ловушек.

Работы по анализу экспериментальных данных были выполнены А.С. Борисенко при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-32-90020. Все прочие исследования, включая разработку теоретической модели, были осуществлены остальными соавторами при финансовой поддержке Лидирующего исследовательского центра "Квантовые вычисления" (соглашение о предоставлении гранта № 014/20).

Список литературы

1. Dubin D. H. E., O'neil T. M. //Reviews of Modern Physics. – 1999. – Т. 71. – №. 1. – С. 87.
2. Fürst H. A. et al. //Physical Review Letters. – 2020. – Т. 125. – №. 16. – С. 163001.
3. Wright K. et al. //Nature communications. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-6.
4. Monroe C. et al. //Reviews of Modern Physics. – 2021. – Т. 93. – №. 2. – С. 025001.
5. Blatt S. et al. //Physical Review A. – 2009. – Т. 80. – №. 5. – С. 052703.

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 РАН, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С ПРОДОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ CdS/ZnSe С РАЗРЫВАМИ ЗОН ВТОРОГО ТИПА

Представлены результаты исследования полупроводникового лазера на основе гетероструктуры с квантовыми ямами CdS/ZnSe второго типа, излучающего в зеленой области спектра, при продольной накачке излучением лазерного диода с длиной волны 438 нм. Проведенные расчеты показали, что коэффициент оптического усиления данной гетероструктуры может превышать 2000 см^{-1} . Получена импульсная генерация на длине волны 508 нм с длительностью импульса 65 нс и мощностью 110 мВт.

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

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

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

INVESTIGATION OF A SEMICONDUCTOR LASER WITH LONGITUDINAL OPTICAL PUMPING BASED ON A CdS/ZnSe HETEROSTRUCTURE OF THE II TYPE

We present the results of a study of a semiconductor laser based on a heterostructure with CdS/ZnSe quantum wells of the II type, emitting in the green region of the spectrum, with longitudinal pumping by radiation of a laser diode with a wavelength of 438 nm. The calculations have shown that the optical gain of this heterostructure can exceed 2000 cm^{-1} . A pulse generation at a wavelength of 508 nm with a pulse duration of 65 ns and a power of 110 mW was obtained.

Интенсивное развитие полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ) с оптической накачкой лазерными диодами (ЛД) связано с возможностью генерировать мощное излучение с высоким качеством лазерного пучка и эффективным внутрирезонаторным преобразованием этого излучения во вторую гармонику [1]. В настоящее время основные результаты достигнуты с ПДЛ на основе гетероструктур AlB₅, излучающих в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Для освоения среднего ультрафиолетового диапазона спектра необходимо реализовать ПДЛ, излучающий на основной частоте в сине-зеленом диапазоне спектра с последующим преобразованием этого излучения во вторую гармонику. Гетероструктуры ZnSe/ZnMgSSe и ZnCdSe/ZnSSe перспективны для сине-зеленого диапазона спектра. Однако эти структуры недостаточно надежны при высоких уровнях накачки.

В данной работе мы исследуем относительно новую гетероструктуру с квантовыми ямами (КЯ) CdS/ZnSe. У этой структуры есть ряд преимуществ перед выше упомянутыми структурами [2]. Однако КЯ CdS/ZnSe имеют разрывы разрешенных зон второго типа, и ожидается, что материальный коэффициент оптического усиления будет недостаточно высоким из-за относительно низкого перекрытия волновых функций неравновесных электронов и дырок, пространственно разделенных в КЯ.

Для оценки материального коэффициента усиления гетероструктуры с КЯ CdS/ZnSe были решены согласованно уравнения Шредингера и Пуассона при разных уровнях накачки. Показано, что с увеличением накачки происходит коротковолновый сдвиг линии усиления и при поверхностной концентрации неравновесных носителей заряда $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ коэффициент усиления превышает 3300 см^{-1} . При использовании 10 КЯ с эффективной длиной усиления 2 нм такой коэффициент усиления при продольной накачке достаточен для преодоления потерь резонатора за один обход в 1.3%. Это уровень потерь реально достижим в эксперименте.

Методом газофазной эпитаксии из элементоорганических соединений были выращены гетероструктуры с 10 спаренными КЯ CdS/ZnSe. При изготовлении активного элемента в виде микрорезонатора, КЯ были помещены в пучности моды этого резонатора. Полезные потери на зеркалах составляли примерно 1.5% за обход резонатора. В данной работе активный элемент не обеспечивал эффективного теплоотвода от структуры, поэтому накачка осуществлялась импульсным излучением ЛД на основе InGaN на длине волны 438 нм с длительностью импульса примерно 100 нс и частотой повторения 20 Гц.

В результате была получена генерация с импульсной мощностью 110 мВт на длине волны 508 нм при длительности импульса генерации 65 нс. Пороговая мощность вложенной накачки составила 4.5 Вт, а дифференциальная эффективность лазера 1.6%. Полученные результаты позволяют надеяться на реализацию «зеленого» ПДЛ с оптической накачкой ЛД. Недостаточно высокие характеристики лазера требуют проведения дополнительных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований грантом № 20-32-90022.

Список литературы

1. Okhotnikov O.G. Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology (Weinheim: Wiley-VCH, 2010).
2. Бутаев М.Р., Козловский В.И., Скасыйрский Я.К. // Квантовая электроника. 2020. Т.50. №7. С.683-687.

Н.Д. БУХАРСКИЙ¹, Ю.В. КОЧЕТКОВ¹, Ф.А. КОРНЕЕВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С КОЛЬЦЕВОЙ МИШЕНЬЮ

В работе рассмотрена перспективная схема реализации источника мощного терагерцового излучения на основе миниатюрной кольцевой мишени, облучаемой мощным фемтосекундным лазерным импульсом. Приведены аналитические оценки основных характеристик создаваемого при помощи предложенной схемы излучения. Продемонстрирована возможность получения направленного терагерцового излучения высокой мощности с задаваемыми геометрией мишени спектральными характеристиками.

N.D. BUKHARSKII¹, I.U.V. KOCHETKOV¹, PH. A. KORNEEV^{1,2}

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

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

GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION VIA INTERACTION OF AN ULTRASHORT INTENSE LASER PULSE WITH AN ANNULAR TARGET

This work considers a perspective scheme of an intense terahertz radiation source based on a miniature annular target, irradiated by an intense femtosecond laser pulse. Analytical estimates of the main properties of radiation generated with the proposed scheme are given. They indicate the possibility of obtaining directed terahertz radiation with high power output and spectral characteristics defined by the target geometry.

Одним из физических процессов, сопровождающих взаимодействие лазерных импульсов высокой интенсивности с твердотельными мишенями, является генерация разрядных токов. Вследствие создания быстрых электронов, покидающих объем мишени, в области взаимодействия формируется сильный положительный потенциал, возбуждающий нейтрализующую электромагнитную разрядную волну, распространяющуюся вдоль периметра протяженной мишени [1].

В данной работе на основе численных расчетов при помощи кода типа «частица в ячейке» Smilei [2] рассмотрен процесс генерации такой волны при взаимодействии лазерных импульсов с интенсивностью порядка 10^{21} Вт/см² и длительностью 24 фс с незамкнутой кольцевой мишенью [3] диаметром ~ 70 мкм. Согласно полученным данным, в данном случае разрядная волна является достаточно хорошо локализованной на размерах порядка периметра мишени. Показано, что при определенных условиях в мишени может формироваться замкнутый электрический контур, в котором эта волна может эффективно удерживаться. Создаваемый таким образом осциллирующий разрядный импульс может быть использован для генерации излучения в спектральном диапазоне, центральная частота которого определяется временем одного оборота разрядного импульса в замкнутом контуре.

Аналитические оценки, проведенные для рассматриваемой схемы, демонстрируют возможность получения терагерцового излучения, угловое распределение плотности которого имеет выраженный максимум на оси мишени, центральная частота определяется размером мишени, а амплитуда электрического поля на этой частоте составляет порядка $\sim 5 \cdot 10^8$ В/м при расстоянии между мишенью и точкой наблюдения 1 см.

Итоговая эффективность преобразования лазерной энергии в энергию терагерцового излучения составляет $\sim 2\%$, что сопоставимо с эффективностью терагерцового излучения, создаваемого в схемах с облучением прямого провода [4, 5], однако в предложенной реализации эта цифра дополняется возможностью управления спектральными характеристиками излучения и его высокой направленностью, что делает данную методику привлекательной для различных высокотехнологических задач. Дальнейшая оптимизация параметров взаимодействия, геометрии, материала и способа закрепления мишени в перспективе способны обеспечить большую эффективность удержания в ней осциллирующего разрядного импульса и суммарную выходную мощность создаваемого им терагерцового излучения.

Список литературы

1. Quinn K., Wilson P.A., Cecchetti C.A. *et al.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Iss. 19. P. 194801.
2. Derouillat J., Beck A., Pérez F. *et al.* // Comput. Phys. Commun. 2018. Vol. 222. PP. 351-373.
3. Bukharskii N., Kochetkov Iu., Korneev Ph. // Appl. Phys. Lett. 2022. Vol. 120. Iss. 1. P. 014102.
4. Nakajima K. // Light Sci. Appl. 2017. Vol. 6. e17063.
5. Tian Y., Liu J., Bai Y. *et al.* // Nat. Photonics. 2017. Vol. 11. PP. 242-246.

С.Л. ВЕРХОШЕНЦЕВА

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью дистанционного зондирования атмосферы на наличие взвешенных веществ. Применение этого метода в геолого-разведочных работах позволит выявлять участки с высоким содержанием взвешенных веществ в атмосфере, что позволит регистрировать локальные выбросы природного газа, а также наблюдать за пространственной динамикой поверхностных утечек в режиме реального времени, проводить топографическую привязку месторождений и др. Кроме того, обнаружение утечек и высоких концентраций метана позволит в кратчайшие сроки реализовать комплекс мер, направленных на предотвращение экологических катастроф.

S.L. VERKHOSHENTSEVA

Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia

ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM FOR DIFFERENTIAL LASER REMOTE SENSING

The relevance of the study is due to the need for remote sensing of the atmosphere for the presence of suspended solids. The use of this method in geological exploration will allow to identify areas with a high content of suspended solids in the atmosphere, which will allow to register local emissions of natural gas, as well as to observe the spatial dynamics of surface leaks in real time, to carry out topographic referencing of deposits, etc. In addition, the detection of leaks and high concentrations of methane will make it possible to quickly implement a set of measures aimed at preventing environmental disasters.

Для обнаружения метана используют различные лазерные системы, учитывающие, что максимумы поглощения метана лежат в областях 1,6 мкм и 3,3 мкм. Предлагаемые методы основаны на дифференциальном лазерном зондировании на близких генерируемых длинах волн, одна из которых почти полностью поглощается на метане. Подобные системы дистанционного зондирования с летательных аппаратов исследуются как теоретически, так и экспериментально. В рамках данной работы проведена разработка, моделирование и усовершенствование математического аппарата системы дистанционного лидарного зондирования для определения концентраций метана в диапазоне 5-10 ppm, что позволит своевременно обнаруживать скопления метана.

За основу была взята физическая модель атмосферы, разработанная в Институте им. В.Е. Зуева СО РАН [1], предназначенный для решения задач дистанционного зондирования атмосферы. Этот образец был модифицирован с учетом таких коэффициентов, как молекулярное рассеяние и затухание. Теория молекулярного рассеяния света Рэлея была использована для расчета объемного коэффициента обратного молекулярного рассеяния в газах. В соответствии с эффектом Доплера расширение спектра излучения, по сравнению со спектром излучения источника происходит только при молекулярном рассеянии. Но стоит отметить, что, в условиях земной атмосферы, это расширение сравнительно невелико и им можно пренебречь. [2] Принцип дифференциального поглощения (ДП) используется в рамках разработанных технических решений программно-аппаратного комплекса лидара и его управления. В основе этого принципа лежит явление резонансного поглощения лазерного излучения внутри контура линии поглощения исследуемого газа). Преимущества дифференциального метода заключаются еще и в том, что в этом случае значения аэрозоля и равны для обоих лучей в силу близости их длин волн, а также геометрического фактора приемной аппаратуры и могут быть учтены при численной обработке результатов измерений. [3] Наиболее удобным для реализации лидара дифференциального поглощения DIAL является гелий-неоновый лазер, который может генерировать излучение на близких длинах волн: 3,3922 мкм является измерительным сигналом (ON), а эталонным называется луч с длиной волны 3,3912 мкм. (OFF) [2].

Анализ полученных данных показал, что для обеспечения требуемой избирательной способности лидара с заданными техническими характеристиками и определенным функциональным составом, устанавливаемого на беспилотный летательный аппарат с максимальной высотой лета, необходимо учитывать высоты до 150 м., в ясную погоду, но при этом необходимо обеспечить уровень шума, за счет обработки сигнала, относительно амплитуды не более 15 процентов. При ухудшении погодных условий допускается падение качества сигнала, но оно может быть компенсировано снижением максимальной высоты полета до 100 м.

Список литературы

1. В.Е. Зуев, Г.М. Креков, Оптические модели атмосферы, Л.: Гидрометеиздат, (1986), 256 с.
2. О.В. Непомнящий, А.И. Постников, Д.В. Попов, Математическое моделирование лазерно-локационного метода определения предельно малых концентраций углеводородов в поверхностном слое // Научное приборостроение», СПб, т. 1, с. 28 (2018), 11-17 с.
3. Технологии дистанционного лидарного зондирования поверхности для обнаружения малых концентраций углеводородов в Сибири и на Крайнем Севере / С.Л. Лещенко // Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия, Том 966, 15-я Международная конференция по промышленному производству и металлургии 18-19 июня 2020 г., Нижний Тагил, Россия.

ЛАЗЕРНОЕ ИСПАРЕНИЕ ОКСИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЛАЗМЕННОЙ МАСС-СЕПАРАЦИИ

Измерена скорость лазерного испарения мишеней из диоксида церия и смеси оксидов церия и иттрия в форвакууме в зависимости от основных параметров квазинепрерывного инфракрасного лазера (мощность излучения, длительность импульса, размер лазерного пятна и плотность лазерного сканирования), а также соотношение газовой и крупнодисперсной фракций в веществе, удалённом из мишеней.

L.S. VOLKOV, N.N. ANTONOV, A.V. GAVRIKOV, G.D. LIZIAKIN, A.O. SEROV

JIHT RAS, Moscow, Russia

LASER EVAPORATION OF RARE-EARTH OXIDES FOR THE PURPOSES OF PLASMA MASS-SEPARATION

In this work we measured the rate of laser vaporization of the samples made of cerium dioxide and of the mixture of cerium and yttrium oxides, depending on the main parameters of quasi-continuous infrared laser (laser point density, radiation power, laser pulse width, and the size of laser spot), and the ratio of gaseous and coarse-dispersed fractions in the substance removed from the samples.

Данная работа относится к циклу исследований в ОИВТ РАН, направленных на развитие технологии плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1]. Лазерное испарение оксидных модельных веществ (которые могут заменить ОЯТ в экспериментах по плазменной сепарации) рассматривается как один из возможных способов введения вещества в плазменный сепаратор. Была проведена серия экспериментов, направленных на оптимизацию параметров лазерного излучения для достижения максимальной скорости испарения модельных веществ и минимизации доли крупных частиц в сопутствующих продуктах разрушения мишени.

Мишени для лазерного испарения представляли собой спечённые таблетки из CeO_2 или из смеси CeO_2 и Y_2O_3 . Плотность образцов составляла 4,5 и 2,4 г/см³ соответственно. Облучение мишеней производилось при давлении 2 мТорр. Для испарения использовалось излучение волоконного квазинепрерывного лазера на длине волны 1067 нм со средней мощностью до 250 Вт. Угол падения лазерного луча на поверхность мишени составлял 50°. Плотность лазерного сканирования (400–1600 точек/мм²), средняя мощность лазера, длительность импульса (100–300 мкс) и размер пятна сканирующего пучка ($1 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^4$ мкм²) были в экспериментах варьируемыми параметрами.

Образовавшийся пар конденсировался в виде кристаллической плёнки на внутренней поверхности цилиндрического коллектора. Крупная фракция (~5 мкм и крупнее) оказывалась на дне коллектора. По изменению массы мишени и коллекторов определялась скорость удаления массы из мишени и скорости образования крупной и газовой фракций. На рис. 1 изображены зависимости скорости удаления массы из мишени и скорости образования крупной фракции от плотности мощности излучения.

Для смеси $\text{CeO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ масс-спектрометрический анализ показал наличие в образующейся паре молекул CeO_2 , CeO и YO . Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия показала, что отношение количества атомов Ce и Y в образце осадённого пара составляет 8,1. В исходной мишени это отношение составляло 0,9.

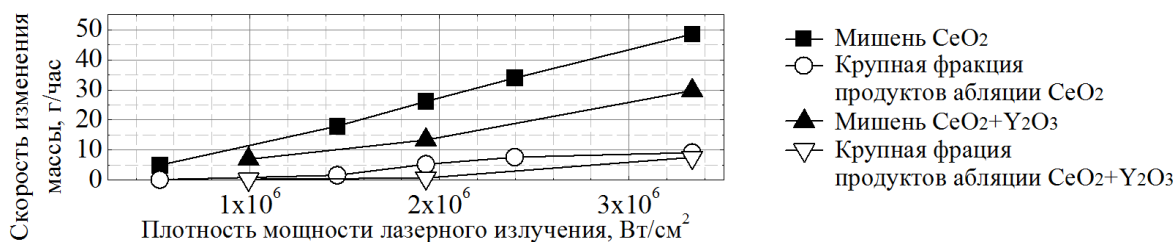


Рис. 1. Скорость испарения двух материалов (CeO_2 и смесь CeO_2 и Y_2O_3) в зависимости от плотности мощности излучения.

Таким образом, была установлена зависимость скорости испарения мишеней и скорости образования крупной фракции от основных параметров лазерного излучения. Существенное различие в количественном составе исходного препарата и испарённого вещества для смеси $\text{CeO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ может быть связано с преимущественным испарением более летучего компонента в используемых условиях лазерного испарения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00716.

Список литературы

1. Liziakin G.D. et al. Plasma mass separation in configuration with potential well // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. Vol. 54. № 41. P. 414005.

В.Д. ВОРОНОВ¹, Э.Д. ИШКИНЯЕВ^{1,2}, С.И. ГЛЕБОВА¹, Д.А. ДЕШИН¹, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО Научно-технического объединения «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

СОЗДАНИЕ ПАРАМАГНИТНЫХ ОБЛАСТЕЙ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ FE-CR-NI МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

В рамках работы были исследованы возможности использования различных методик обработки лазерным излучением для равномерного нагрева материала с целью получения парамагнитных областей (аустенита) мартенситной стали на основе Fe-Cr-Ni. Получены образцы, состоящие из однородных парамагнитных областей шириной 10 мм и длиной до 40 мм. Проведены механические испытания таких образцов.

V.D. VORONOV¹, E.D. ISHKINYAEV^{1,2}, S.I. GLEBOVA¹, D.A. DESHIN¹, V.N. PETROVSKIY¹

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

²IPG IRE-Polus, Fryazino, Russia

CREATION OF PARAMAGNETIC REGIONS IN ALLOYS BASED ON THE Fe-Cr-Ni SYSTEMS BY LASER INDUCED HEATING

In the current work the possibilities of using various methods of laser radiation treatment for uniform heating of the material in order to obtain paramagnetic regions (austenite) of martensitic steel based on Fe-Cr-Ni were investigated. Samples consisting of homogeneous paramagnetic regions with a width of 10 mm and a length of up to 40 mm were obtained. Mechanical tests of such samples have been carried out.

В некоторых задачах приборостроения необходимо использовать высокопрочные парамагнитные материалы. Для решения этой задачи можно применить аустенитно-мартенситные сплавы системы Fe-Cr-Ni, в которых при термической обработке осуществляется фазовый переход из ферромагнитного мартенсита в парамагнитный аустенит. Такое превращение возможно при нагреве материала до температур 600°-800°С. Для создания парамагнитных зон целесообразно использовать лазерное излучение, для которого характерны локальное воздействие и высокие скорости обработки. Целью данной работы является изучение режимов обработки, при которых можно достичь фазовый переход в заданных зонах материала.

Для предотвращения перегрева необходимо использовать источник энергии с максимально однородным распределением плотности мощности и варьировать параметры обработки., поэтому были исследованы три методики на возможность достижения данной цели: движущийся с низкой скоростью (до 2 мм/с) источник лазерного излучения с прямоугольным близким к однородному профилем интенсивности размерами 11x2 мм, неподвижный источник с однородным прямоугольным пятном и сканирование области с высокой скоростью обработки (более 1000 мм/с).

Перед экспериментальным исследованием была построена модель лазерного нагрева с использованием метода конечных элементов. На основе построенной модели были подобраны режимы для обработки различными оптическими системами, а также была выбрана форма оснастки, необходимая для получения изотропного теплоотвода материала. Наличие получения необходимого фазового перехода подтверждалось использованием обычного магнита и измерениями микротвердости (аустенитная фаза характеризуется меньшей твердостью, чем мартенситная).

Эксперименты и измерения микротвердости показали, что наиболее равномерный нагрев можно получить при использовании сканатора. Однако, обработка сканированием обладает низкой адаптацией к изменению геометрии обрабатываемой области. Неподвижный источник с прямоугольным пятном не даёт равномерного нагрева из-за неоднородности профиля пятна. Оптимальной является методика обработки движущимся прямоугольным пятном с использованием «маски» для получения заданного геометрического распределения фаз. Образцы на растяжение готовились в форме лопаток с различной геометрией области обработки (рис. 1).

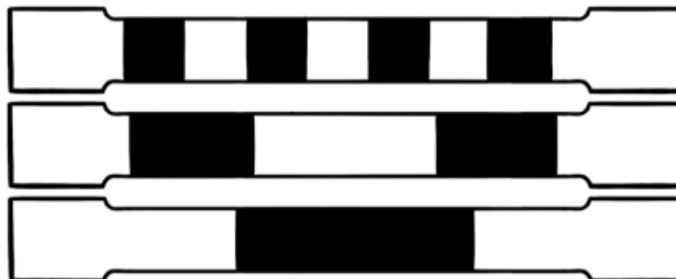


Рис. 1. Схема обработки. Площадь зоны нагрева (чёрный цвет) на всех геометриях не изменялась

Результаты испытаний на растяжение показывают значительное повышение пластичности образцов после обработки, и уменьшение предела прочности, что также подтверждает образование аустенитной фазы.

А. А. ГАРМАТИНА^{1,2}, В.М. ГОРДИЕНКО^{2,4}, А.А. КОРШУНОВ^{2,5}, М. Д. МОЖАЕВА^{2,5},
А.И. БАРАНОВ³, Д.В. МЯСНИКОВ³, И.Г. ДЬЯЧКОВА², В.Е. АСАДЧИКОВ², Н.В. МИНАЕВ²

¹НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

³ООО Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полус», Фрязино, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ЗАДАЧ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Впервые создан эффективный микрофокусный фемтосекундный лазерно-плазменный источник характеристического рентгеновского излучения, функционирующий на базе волоконного итербиевого лазера с энергией 2-20 мкДж в импульсе длительностью 300 фс и высокой частотой следования импульсов (100 кГц) на металлическую мишень, расположенную в воздухе. Установлено, что характеристическая линия хрома, железа, меди возникает при минимальной энергии 2 мкДж, а при увеличении энергии до 6 мкДж с использованием режима модуляции серий импульсов достигнут выход рентгеновских фотонов более чем 10^6 фот/с в 2π при интенсивности сфокусированного лазерного пучка около 10^{14} Вт/см². Минимальный размер рентгеновского источника, оцененный по размеру аблированной области на поверхности мишени оказался менее 5 мкм.

A.A. GARMATINA^{1,2}, V.M. GORDIENKO^{2,4}, A.I. BARANOV³, D.V. MYASNIKOV³, A.A. KORSHUNOV^{2,5},
M.D. MOZHAJEVA^{2,5}, I.G. DYACHKOVA, V.E. ASADCHIKOV², N.V. MINAEV²

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia

³IPG IRE-Polus, Fryazino, Russia

⁴Moscow State University M.V. Lomonosov, Moscow, Russia

⁵National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

EFFECTIVE SOURCE OF LINE X-RAYS BY FEMTOSECOND FIBER LASER FOR TASKS OF X-RAY MICROSCOPY

Efficient femtosecond microfocus line X-ray laser-plasma source driven by low energy (2-20 μ J) 100 kHz rate ytterbium fiber laser with pulse duration of 300 fs interacted with metal target in ambient atmosphere environment has been created for the first time. It was found that characteristic Cr, Fe, Cu line appears at a minimum energy of 2 μ J, and when the energy is increased to 6 μ J, using pulses series modulation regime it is possible to achieve an X-ray photon flux of more than 10^6 photons/s in 2π . The minimum size of the X-ray source, estimated from the size of ablated area on the target surface, turned out to be less than 5 μ m.

Для задач получения рентгеновских фазоконтрастных изображений требуется рентгеновский источник малого диаметра с большим числом фотонов. В качестве такого источника активно используются лазерно-плазменные источники рентгеновского излучения. Размер источника рентгеновского излучения зависит от интенсивности лазерного излучения на поверхности мишени и при используемых интенсивностях порядка 10^{17} Вт/см² обычно оказывается в 2-5 раз больше лазерной перетяжки пучка и составляет не менее 10 мкм. Используя острогофокусированный (NA=0.33) пучок фемтосекундного (300 фс) волоконного итербиевого лазера (частота (100 кГц) с энергией в импульсе несколько мкДж, можно достичь интенсивности порядка 10^{14} Вт/см², достаточной для генерации рентгеновского излучения [1]. При этом размер источника рентгеновского излучения должен быть сравним с размером лазерной перетяжки. Высокая частота следования импульсов позволит получить поток фотонов, сравнимый с получаемым с использованием рентгеновских трубок и достаточный для получения фазово-контрастных изображений.

Нами установлено, что взаимодействие волоконного лазера с энергией 2-20 мкДж на металлическую мишень (медь, сталь), расположенную в воздухе, сопровождается генерацией характеристического рентгеновского излучения. Обнаружено, что при энергии одиночного импульса 6 мкДж удается достичь выхода рентгеновских фотонов более чем 10^5 фот/с в 2π . В режиме модуляции серии импульсов достигнут выход рентгеновских фотонов более 10^6 фот/с в 2π . Минимальный размер рентгеновского источника, оцененный по размеру аблированной области на поверхности мишени оказался менее 5 мкм.

Работа выполнена в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры от 29 сентября 2021 г. № 2021-951-ФП5-3.

Список литературы

1. Garmatina A. A. et al. X-ray generation under interaction of a femtosecond fiber laser with a target and a prospective for laser-plasma x-ray microscopy // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. V. 2036. №. 1. P. 012037.

А.Ф. ГЛОВА, И.Д. КЛЮЧКОВ, А.Ю. ЛЫСИКОВ, Л.И. КНЯЗЕВА, А.Н. КИРИЧЕНКО, В.А. БАРСУК
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТВЕРДОСПЛАВНЫЙ РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Измерены пространственные распределения температуры электронов и интенсивности свечения молекулярного комплекса C_2 в плазменной струе лазерного плазматрона, работающего на смеси Ar с молекулярными добавками. Определены пороги поддержания разряда. Получены алмазные покрытия на режущих вставках токарного резца из твердого сплава ВК8.

A.F. GLOVA, I.D. KLOCHKOV, A.YU. LYSIKOV, L.I. KNYAZEVA, A.N. KIRICHENKO, V.A. BARSUK
SRC RF TRINITI, Moscow, Russia

APPLICATION OF A LASER PLASMATRON FOR DIAMOND COATINGS DEPOSITION ON A CEMENTED-CARBIDE CUTTING TOOL

The spatial distributions of the electron temperature and the glow intensity of the C_2 molecular complex in the plasma jet of a laser plasmatron operating on a mixture of Ar with molecular additives have been measured. The thresholds for maintaining the discharge have been determined. Diamond coatings were obtained on the cutting inserts of a turning tool made of WC8 hard alloy.

Непрерывный оптический разряд в режиме лазерного плазматрона является эффективным средством синтеза алмазных покрытий, продемонстрированном в [1] при осаждении на плоские подложки из вольфрама. Осаждение происходит при атмосферном давлении и в отсутствие вакуумной камеры.

В настоящей работе этот метод используется для осаждения алмазных покрытий на режущие вставки токарного резца из твердого сплава ВК8. Процессу осаждения предшествовало определение порогов поддержания оптического разряда в сфокусированном луче непрерывного CO_2 -лазера, измерение температуры электронов в плазменной струе и интенсивности свечения комплекса C_2 , ответственного за образование алмаза на поверхности [2].

Пороговые мощности поддержания разряда в зависимости от скорости потока газа из-за абберрационного уширения радиуса фокального пятна заметно возрастают по сравнению с расчетом для дифракционного радиуса. Температура электронов измерялась методом отношения интенсивностей двух спектральных линий [3] для линий Ar с длиной волны 415 и 728 нм. При типичных условиях работы плазматрона: состав смеси $Ar:H_2:CH_4=1:0,07:0,0021$, давление 1 атм, скорость потока 4,7 м/с, мощность излучения лазера 1840 Вт, температура на оси струи на расстоянии 2 мм от фокуса линзы достигает 20 кК и монотонно уменьшается вдоль струи. Профили радиальной зависимости температуры, полученные после абелизации измеренных значений интенсивности, имеют максимум на оси. Получено пространственное распределение температуры. Относительная концентрация молекулярного комплекса C_2 , определяемая по интенсивности свечения разряда на длине волны 516 нм, также имеет максимум на оси и монотонно уменьшается в радиальном направлении. При увеличении продольной координаты осевая концентрация возрастает. Этот эффект связан с уменьшением степени диссоциации C_2 в более холодных областях разряда.

Режущая вставка представляет собой правильный пятигранник толщиной 4 мм с длиной боковых граней 11 мм. Алмазное покрытие площадью ~ 1 см² наносится на часть фронтальной поверхности вблизи одной из вершин пятигранника. Использовалась стандартная процедура подготовки поверхности [4]. На рис.1 приведена фотография фрагмента одного из покрытий после осаждения в течение 30 мин при температуре около 1000°C.

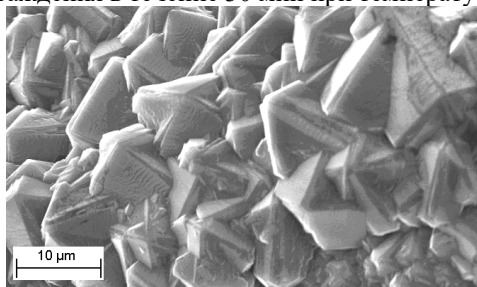


Рис. 1. Фотография фрагмента покрытия

Рамановские спектры полученных покрытий содержат основную линию алмаза 1332 см⁻¹, рентгеновские спектры отражают близкое к 100% содержание углерода. Увеличение площади покрытия возможно при сканировании плазменной струи.

Список литературы

1. Konov V.I., Uglov S.A. // Quantum Electron. 1998. V. 28, № 4. P. 281.
2. Gruen D.V., Zuiker C.D., Krauss F.R., Pan X.J. // J. Vac. Sci. & Techn. A. 1995. V. 13. P. 1628.
3. Griem H. Plasma Spectroscopy. // Moscow, Atomizdat. 1969. 452 p.
4. Haubner R., Kalss W. // Int. J. of Refractory Metals & Hard Materials. 2010. V. 28. P. 475.

В.Л. ГОРШЕНИН¹, В.Е. РОДИМИН²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Центр компетенций НТИ «Квантовые коммуникации», НИТУ «МИСИС», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ РАЗЪЮСТИРОВОК ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ПОТЕРИ АТМОСФЕРНОГО КАНАЛА УСТАНОВКИ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ

Рассмотрено влияние разъюстировок на энергетические потери оптической системы открытого канала связи в системе квантовой криптографии. Полученный атмосферный канал применен в реальной установке генерации квантовых ключей.

V.L. GORSHENIN, V.E. RODIMIN²

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

²QRate, Moscow, Russia

RESEARCH OF OPTICAL SYSTEM MISADJUSTMENTS FOR ENERGY LOSS OF THE ATMOSPHERIC CHANNEL OF THE QUANTUM CRYPTOGRAPHY SETUP

QBER in BB84 protocol depends by channel's attenuation. We report dependencies of transition through open quantum channel by misadjustments of ferule position in optical system. The obtained atmospheric channel is applied in of quantum cryptography setup.

Квантовая криптография обеспечивает генерацию ключа шифрования для дальнейшего безопасного общения. Согласно протоколу BB84[1] для генерации ключа необходима передача одиночных фотонов между двумя сторонами. Ошибка генерации ключа QBER (quantum bit error ratio) для протокола BB84 зависит от затухания канала [2].

В работе рассматривается открытый канал, соединяющий Алису и Боба, выполненных из оптоволоконных элементов. Открытый канал состоит из жестко закрепленных линз источника и линз приемника. Торцы оптоволоконна подвижны относительно линз. Симуляция оптической системы проводилась в среде Zemax OpticStudio. Длина открытого канала 13 см. В зависимости от продольных положений торцов схема имеет два минимума затухания: сколлимированный и расходящийся в воздухе пучок. Затухание сколлимированного пучка $\alpha_{col} = 1,57$ дБ (результат симуляции $\alpha_{col}^{sim} = 1,64$ дБ). Для расходящегося пучка $\alpha_{div} = 2,08$ дБ ($\alpha_{div}^{sim} = 2,21$ дБ). Расходимость пучка составляет 1,3 мрад. Разъюстировки положения торца оптоволоконна можно разделить на продольные и поперечные. Зависимости принятой мощности от продольных разъюстировок, согласуются с результатом симуляции (рис. 1). Зависимость принятой мощности при поперечной разъюстировке имеет вид гауссова распределения с полушириной 8 мкм. Это значительно меньше, чем аналогичная полуширина для продольных разъюстировок: более 100 мкм.

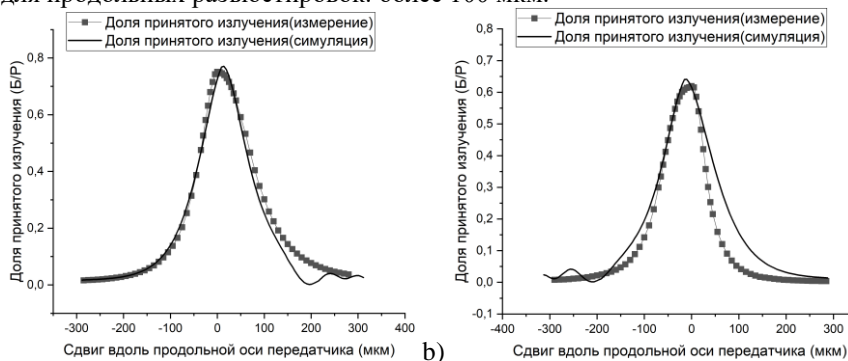


Рис. 1. Зависимости принятой мощности от разъюстировки по продольной оси передатчика а) зависимости для сколлимированного пучка, б) зависимости для расходящегося пучка

Проведен опыт использования атмосферного канала в установке квантовой криптографии [3], работающей на протоколе BB84. Ошибка генерации ключа волоконного канала $QBER_{вол} = 7\%$ обусловлена шумами детекторов одиночных фотонов и видностью оптоволоконного интерферометра. Участие атмосферного канала дает дополнительную ошибку в 2%. Длина сгенерированного совпавшего ключа составила: $L_{вол} = 2840$ бит, $L_{атм} = 1432$ бит. При лучшей настройке оптоволоконной системы можно обеспечить секретную передачу квантовых ключей.

Список литературы

1. С. Н. Bennett and G. Brassard. "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing". In Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, volume 175, page 8. New York, 1984
2. С. Gobby et al, Quantum key distribution over 122 km of standard telecom fiber, Appl. Phys. Lett. 84, 3762 (2004)
3. V. E. Rodimin et al, Modular quantum key distribution setup for research and development applications, Journal of Russian Laser Research, 2019, 40(3)

Е.А. ДАВЫДОВА, Н.Н. ЩЕДРИНА, В.М. ПРОКОПЬЕВ, И.А. ФИЛАТОВ, А.М. АРБУЗОВ,
Г.В. ОДИНЦОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ И АЛЮМИНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРИДАНИЯ АНТИКОРРОЗИОННЫХ И ПРОТИВООБРАСТАЮЩИХ СВОЙСТВ

В данной работе продемонстрировано изменение параметра смачивания на поверхности стали и алюминия при различных способах обработки, включающих в себя предварительное импульсное наносекундное лазерное воздействие, для придания поверхности свойств, значимых в промышленном производстве. Получены значения углов смачивания при различных способах обработки для создания гидрофобных структур.

E.A. DAVYDOVA, N.N. SHCHEDRINA, V.M. PROKOPIEV, I.A. FILATOV, A.M. ARBUZOV,
G.V. ODINTSOVA

ITMO University, St. Petersburg, Russia

CONTROL OF THE SURFACE WETTING OF STEEL AND ALUMINUM BY LASER STRUCTURING FOR ANTI-CORROSION AND ANTI-FOULING PROPERTIES

This paper demonstrates the change in the wettability parameter on the surface of steel and aluminum during various processing methods, including preliminary pulsed nanosecond laser exposure, to impart properties of the surface that are significant in industrial production. Values of wetting angles were obtained for various processing methods to create hydrophobic structures.

Возможность контролировать смачивание поверхности с помощью лазерного структурирования, придавая материалам гидрофобные или гидрофильные свойства, является значимой для многих сфер, например, для промышленности. Гидрофобные структуры в немалой мере нашли свое применение при предотвращении коррозии [1] и при защите судов от биообрастания бактериальным и кальциевым налетами [2].

В данной работе продемонстрированы результаты лазерного структурирования поверхностей с целью контроля смачивания для придания антикоррозионных свойств и для защиты объектов от биообрастания. В качестве инструмента обработки выбран волоконный итербиевый лазерный источник с длиной волны 1064 нм, так как металлы хорошо поглощают на данной длине волны. Для оценки морфологии структур и состояния смачивания использовались методы оптической микроскопии, профилометрии и метод лежащей капли. В работе были рассмотрены следующие способы формирования гидрофобных структур: лазерное структурирование с последующим продолжительным хранением на воздухе, лазерное структурирование с последующим низкотемпературным отжигом, лазерное структурирование и обработка гидрофобизирующим спреем Glaco. Тесты на коррозионную стойкость проводились в соответствии с испытаниями при воздействии нейтрального соляного тумана, а оценка степени биообрастания проводилась с помощью конфокальной микроскопии.

При изучении процесса биообрастания подбор режимов осуществлялся, исходя из того, что порог сцепления некоторых микроорганизмов, участвующих в биообрастании, приближается к 200 мкм. Соответственно, целью было выбрать такие геометрические параметры, чтобы микроорганизмы имели меньше точек контакта с поверхностью. В нашей работе шаблоном структур была решётка, геометрические параметры неструктурированных областей были заданы 16 мкм и 66 мкм, глубина структур в 10 мкм. Образцы с разными обработками помещались в пробу воды из Финского залива на месяц, замеры углов производились через каждую неделю. При тестах на антикоррозию формирование гидрофобных структур проводилось также при помощи изменения рельефа посредством лазерного излучения или создания оксидного слоя на поверхности стали. Гидрофобный слой поверхности может снизить коррозионное разрушение, поскольку он способен препятствовать оседанию воды и окислению.

По результатам изучения биообрастания и коррозии для образцов, исследуемых сразу после лазерной обработки, наблюдается небольшой прирост угла с течением времени для всех режимов. В ходе исследований зависимости были сделаны выводы о переходе структур в водной среде из гидрофобного состояния в гидрофильное при обработке низкотемпературным отжигом и при нахождении образцов после лазерного структурирования на воздухе. Образцы после лазерного структурирования и Glaco показали супергидрофобный угол смачивания сразу после обработки, что намного больше результатов после других обработок, так как силанизированные наночастицы кремния, находящиеся в составе спрея, создают сильную ковалентную связь органических соединений, образуя на поверхности прочные углеводородные гидрофобные соединения.

Список литературы

1. Elttayef A.K., Abass L.N., Abd Al-Latif L.G. Improvement mechanical properties of Inconel and Monel alloys synthesis by laser coating // Opt. Laser Technol. Elsevier Ltd. – 2019. – Vol. 109. – P. 49–54.
2. Ferrari, M., Benedetti, A., Santini, E., Ravera, F., Liggieri, L., Guzman, E., & Cirisano, F. Biofouling control by superhydrophobic surfaces in shallow euphotic seawater. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2015. – 480. – P. 369–375.

Е.А. ДАНИЛОВ¹, С.А. УРЮПИН^{1,2}

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МЕТАЛЛ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрена генерация низкочастотных полей при облучении металла фемтосекундным импульсом сфокусированного в полосу лазерного излучения. Показано, что генерируемое поле состоит из полей поверхностной и квазицилиндрической волн. Изучена конкуренция этих полей. Выявлены условия, в которых можно различать импульсы генерируемых волн.

E.A. DANILOV¹, S.A. URYUPIN^{1,2}

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

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

GENERATION OF LOW-FREQUENCY FIELDS AT THE EFFECT OF A FEMTOSECOND PULSE OF FOCUSED LASER RADIATION ON A METAL

The generation of low-frequency fields upon irradiation of a metal with a femtosecond pulse of laser radiation focused into a strip is considered. It is shown that the generated field consists of fields of the surface and the quasi-cylindrical waves. The competition of these fields is studied. The conditions under which it is possible to distinguish the pulses of generated waves are found.

При воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на металл возможны различные нелинейные явления, одним из которых является генерация широкополосных низкочастотных полей в терагерцевом диапазоне частот. Особый интерес представляют такие условия воздействия сфокусированного лазерного излучения, когда происходит генерация низкочастотных поверхностных волн.

В работах [1,2] детально изучена генерация низкочастотных полей за счет воздействия на электроны проводимости пондеромоторной силы в случае, когда лазерное излучение сфокусировано в узкую полосу на поверхности металла. Получено решение уравнений, описывающих генерацию низкочастотных полей, и дан вывод интегрального выражения для фурье-образа низкочастотного поля. Выполнен детальный анализ этого выражения и показано, что суммарное низкочастотное поле состоит из полей поверхностной и квазицилиндрической волн. Изучена конкуренция генерируемых полей, и показано, что вблизи поверхности имеется область, в которой доминирует поверхностная волна. Размеры этой области определяются соотношением между действительной и мнимой частями диэлектрической проницаемости на частотах генерируемых полей.

Дан анализ формы импульсов квазицилиндрической и поверхностной волн, на поверхности Au, Ag, Al, Cu. Форма импульса квазицилиндрической волны слабо изменяется по мере удаления от полосы фокусировки. В свою очередь, форма импульса поверхностной волны изменяется по мере удаления от полосы фокусировки: импульс уширяется и на его профиле появляются дополнительные осцилляции, обусловленные частотной дисперсией металла (см.рис.1). Найденные отличия позволяют экспериментально различить генерируемые поля.

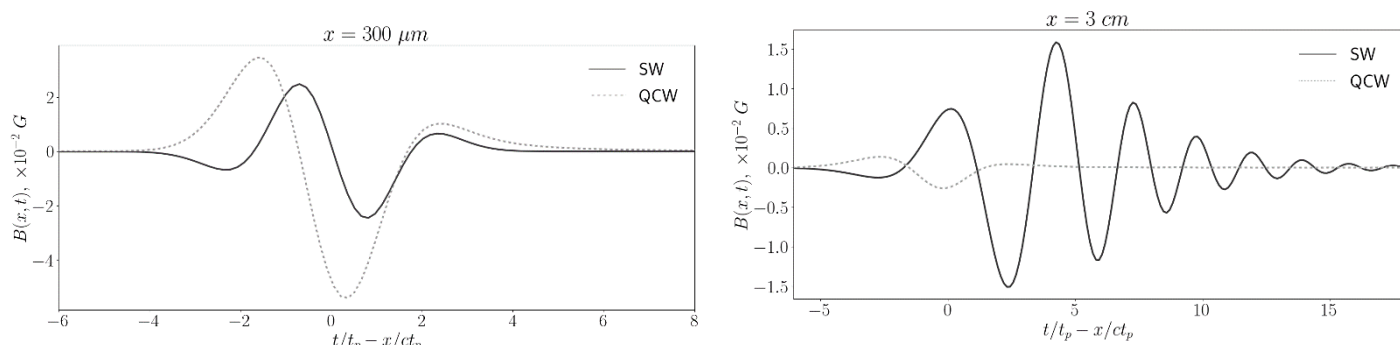


Рис. 1. Формы импульсов генерируемых низкочастотных полей на поверхности меди

Список литературы

1. E. A. Danilov, S. A. Uryupin // Opt. Lett. 2021. V.46. P. 2521.
2. E. A. Danilov, S. A. Uryupin // J. Opt. Soc. Am. B. 2021 V.38. P. 2612.

А.Д. ДОЛГОПОЛОВ, В.Р. ГРЕСЬКО, В.В. СМОРНОВА, М.М. СЕРГЕЕВ

Университет ИТМО, Факультет нанoeлектроники

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ПОВЫШЕНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ZNO ПЛЕНОК С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА

При помощи воздействия непрерывного лазерного излучения было получено увеличение фоточувствительности ZnO тонких плёнок с наночастицами серебра к УФ-излучению. Для плёнок удалось увеличить соотношение величины фототока, образующегося при облучении плёнки с длиной волны 343 нм, и величины теневого тока с 4,6 до 7,4. Модификация структуры пленок была связана с термическим действием лазерного излучения. Происходила рекристаллизация структуры ZnO и изменение размеров и концентраций наночастиц.

A.D. DOLGOPOLOV, V.R. GRESKO, V.V. SMIRNOVA, M.M. SERGEEV

ITMO University, Faculty of Nanoelectronics

LASER-INDUCED IMPROVEMENT OF THE PHOTO SENSITIVITY OF ZNO FILMS WITH SILVER NANOPARTICLES

An increase in the photosensitivity of ZnO thin films with silver nanoparticles to UV radiation obtained via using continuous laser radiation. For films, it was possible to increase the ratio of the photocurrent generated by irradiation of the film with a wavelength of 343 nm and the shadow current from 4.6 to 7.4. Modification of the film structure was associated with the thermal action of laser radiation. The ZnO structure recrystallized and the nanoparticle sizes and concentrations changed.

AlZnO (AZO) тонкие плёнки за счет своих физических свойств, нередко применяются в качестве фоточувствительных элементов и слоев различных оптико-электронных устройств, в т.ч. фотодетекторов. Добавление в состав плёнки серебряных наночастиц позволяет значительно увеличить чувствительность сенсоров в определенном спектральном диапазоне длин волн за счет явления локализованного плазмонного резонанса, а также увеличить проводимость материала за счет, возникающего на границе металл-полупроводник барьера Шоттки. Как правило, для изменения свойств плёнок в широком диапазоне, и как следствие чувствительности и прочих характеристик таких детекторов, требуется внесение изменений в технологию изготовления материала. В большинстве случаев это проблематично для производства с уже отлаженным технологическим процессом [1]. Лазерное излучение является весьма удобным инструментом для быстрого, высоко эффективного и вместе с этим простого в реализации способа локальной модификации свойств плёнок с возможностью их коррекции в режиме реального времени. Подбирая длину волны излучения и режим облучения, можно воздействовать как на саму матрицу AZO, так и на наночастицы, расположенные в ней [2].

Для лазерной модификации структуры AZO плёнки с серебряными наночастицами использовалось сканирование малым пятном непрерывного излучения с длиной волны 405 нм. На поверхности плёнок при скорости сканирования 4 мм/с и различных мощностях излучения были записаны области, размерами 4x4 мм². Результаты оптической микроскопии показали изменение морфологии плёнок, происходило уплотнение их структуры и рекристаллизация. Также происходило изменение размера наночастиц и смещение пика плазмонного резонанса в область более коротких длин волн. Исследование электрических характеристик показывало, что при мощности излучения 0,11 мВт удалось значительно понизить электрическое сопротивление материала. Измерение величины фототока, возникающего при экспонировании такой области излучением с длиной волны 343 нм, показало, что соотношение сигнал-шум увеличивалось с 4,6 до 7,6.

Представленный способ лазерной обработки пленок непрерывным излучением видимого диапазона может быть использован для увеличения эффективности фотодетекторов УФ-излучения на основе ZnO тонких плёнок с металлическими наночастицами.

Список литературы

1. Tzeng S. K., Hon M. H., Leu C. Improving the performance of a zinc oxide nanowire ultraviolet photodetector by adding silver nanoparticles //Journal of the Electrochemical Society. – 2012. – Т. 159. – №. 4. – С. H440.
2. Singh S., Park S. H. Fabrication and characterization of Al: ZnO based MSM ultraviolet photodetectors //Superlattices and Microstructures. – 2015. – Т. 86. – С. 412-417.

М.С. ГРИГОРЬЕВА^{1,2}, А.Ю. ХАРИН², И.А. ЕВДОКИМОВА², И.Н. ЗАВЕСТИВСКАЯ^{1,2},
В.Ю. ТИМОШЕНКО^{1,2,3}

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ МИШЕНИ НА ПОРОГ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В работе представлены результаты по моделированию методом молекулярной динамики процесса лазерной абляции мишеней пористого кремния. Исследовано влияние размера пор на скорость и порог абляции.

M.S. GRIGORYEVA^{1,2}, I.A. EVDOKIMOVA², A.YU. KHARIN², I.N. ZAVESOVSKAYA^{1,2},
V. YU. TIMOSHENKO^{1,2,3}

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*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

INVESTIGATION OF TARGET POROSITY EFFECT ON LASER ABLATION THRESHOLD IN SILICON BY MOLECULAR DYNAMIC SIMULATION

The results of molecular dynamics modeling of the porous silicon targets laser ablation are presented. The pore size effect on the ablation rate and threshold was investigated.

Одним из перспективных методов производства особо чистых и не токсичных наночастиц кремния, в том числе для медицинских применений, является метод лазерной абляции и фрагментации, позволяющий получить узкое распределение производимых наночастиц по размерам как в воздухе, так и в коллоидных растворах. Метод лазерной абляции широко используется как для структурирования подложек, так и синтеза наночастиц [1-2].

В представленной работе было проведено моделирование лазерной абляции мишени из пористого кремния при облучении короткими лазерными импульсами с помощью метода молекулярной динамики. Установлена зависимость порога лазерной абляции от размера пор. При уменьшении размеров пор в мишенях до 1 нм порог абляции снижается почти на 40% по сравнению с порами размером от 5 нм и больше. Несмотря на снижение порога абляции, скорость абляции пористых подложек кремния существенно ниже, чем кристаллических мишеней.

Скорость абляции существенно падает при увеличении пористости, что может быть связано с гашением механических колебаний порами. Одновременное падение порога абляции и ее производительности с ростом величины пористости приводит к необходимости оптимизации исходной пористости мишени для каждой конкретной задачи синтеза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00861.

Список литературы

1. P. Blandin, et al. J. Mater. Chem. B (2013) Vol.1, pp. 2489–2495
2. M. B. Gongalsky, et al. Sci. Rep. (2016) Vol. 6, p. 24732

К.А. ЕГОРОВА, К.А. РОЗАНОВ, Д.А. СИНЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМОЙ ОКСИДИЗАЦИИ НА ЗНАЧЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ПРИ АДДИТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

В настоящей работе исследовано влияние предварительной обработки (окисления) на процесс лазерного структурирования поверхностного слоя титанового образца под слоем графита. Изучена микроструктура поверхностного слоя с повышенной микротвердостью, приведены результаты измерения микротвердости образцов в зависимости от параметров лазерного воздействия.

X.A. EGOROVA, K.A. ROZANOV, D.A. SINEV

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

INFLUENCE OF CONTROLLED OXIDATION PARAMETERS ON THE VALUE OF MICRO-HARDNESS BY ADDITIVE LASER TREATMENT

This report investigates the effect of pretreatment (oxidation) on the process of laser structuring of the surface layer of a titanium sample under a graphite layer. The microstructure of the surface layer with increased microhardness is researched, and the microhardness values of samples depending on the parameters of laser exposure are presented.

Одним из направлений применения и развития аддитивной лазерной обработки является материаловедение, так как благодаря возможности управления механическими и функциональными свойствами можно придавать новые качества уже имеющимся сплавам. Наибольший интерес представляет получение новых свойств материалов путем модификации поверхности с помощью лазерного воздействия под слоем вспомогательных веществ [1], в настоящей работе под слоем графитового порошка. В ряде современных исследований аддитивная лазерная обработка титана в присутствии вспомогательных углерод-содержащих веществ осложнена низкими скоростями происходящих фазово-структурных изменений, многоэтапностью технологических процессов и в целом сложностью работы со специфическими материалами. В то же время имеются сведения о том, что получение твердофазных соединений титана методом аддитивной лазерной обработки может быть облегчено путем предварительной активации поверхности посредством окисления титанового образца [2]. Также известно, что управляемое лазерно-индуцированное создание оксидов на поверхностях функциональных материалов, включая титан и его сплавы, является основой для ряда технологических применений, например, для цветной лазерной маркировки металлических изделий [3].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование зависимости значений микротвердости от параметров управляемой оксидизации методом аддитивной лазерной обработки под слоями вспомогательных веществ при воздействии лазерного излучения коммерчески доступной лазерной установки Минимаркер-2.

Для сравнительного анализа влияния слоя графита на результат лазерной обработки были проведены серии экспериментов, в которых обработка производилась путем записи структур непосредственно на различные предварительно сформированные лазерно-индуцированные оксидные пленки под слоем графита. По результатам просвечивающей электронной микроскопии показано, что повышение твердости поверхностного слоя титановых сплавов при лазерном структурировании связано с рекристаллизацией и образованием приповерхностного нанокристаллического слоя. На полученных структурах было проведено испытание образцов на микротвердость с помощью микротвердомера ПТМ-3М путем нанесения отпечатка по методу Виккерса на испытываемую поверхность образца под действием статической нагрузки. Исследования были проведены с различными предварительно-записанными подложками при варьируемых значениях скорости сканирования лазерной установки в диапазоне от 100 до 500 мм/с.

В ходе выполнения работы были разработаны технологические карты лазерного воздействия, в которых продемонстрирована зависимость микротвердости поверхностного слоя титановых образцов при различных предварительно сформированных оксидных подложках. По сравнению с исходной поверхностью титановой пластины значение микротвердости при структурировании под слоем графитового порошка повысилось не менее чем в 10 раз.

Авторы благодарят группу проф. Ю.Р.Колобова (ИПХФ РАН) за проведенные исследования методом просвечивающей электронной микроскопии. Работы выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 г., Со-глашение № 075-11-2021-045 от 24.06.2021, название проекта «Создание высокотехнологичного производства оборудования и технологий для лазерной функционализации поверхности изделий медицинского назначения.

Список литературы

1. H.M. Flower, A. Walker and D.R.F. West The structure of Ti-6Al-4V laser alloyed with carbon// Scripta Metallurgica 1985, Vol.19, pp. 923-926.
2. Кипарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение//М.: Металлургия, 1987, 216 с.
3. Veiko V.P., Andreeva Y.M., Cuong L., et al. Laser paintbrush as a tool for modern art // Optica, 2021, Vol. 8, No. 5, pp. 577-585

НАНОВЫСТУПЫ НА ЗЕРКАЛАХ ИЗ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ, ВОЗНИКШИЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ УФ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

При исследовании оптикопластического эффекта обнаружена генерация на поверхности зеркал их меди и ее сплавов нано- и микровыступов высотой до 1 μm . Исследована зависимость объема поднятий от плотности энергии и числа импульсов воздействующего наносекундного УФ лазера.

V.YU. ZHELEZNOV, T.V. MALINSKY, V.E. ROGALIN, YU.V. KHOMICH
Institute of Electrophysics and Electric Power of RAS, Saint Petersburg, Russia

NANOPROTRUSIONS ON MIRRORS FROM COPPER AND ITS ALLOYS ARISING DURING IMPACT OF NANOSECOND UV LASER PULSES

When studying optoplastic effect, the generation of nano- and micro-protrusions up to 1 μm high on the surface of mirrors made of copper and its alloys was discovered. The dependence of the volume of protrusions on the energy density and the number of pulses of impacting nanosecond UV laser was studied.

В работах [1-3] исследовано воздействие лазерных импульсов ($\lambda = 355$ нм, длительность $\tau = 10$ нс, частота повторения $f = 10$ Гц) на зеркала из меди и ее сплавов. В допороговом режиме (при сохранении конденсированного состояния), при плотности энергии $E = 0.1 - 1.0$ Дж/см² металл в облученной зоне вспучивался. Обнаруженный эффект назван оптикопластическим. При превышении порога обычно происходило плавление и испарение металла с образованием кратера.

Исследовались образцы зеркал из бескислородной меди и её сплавов (Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-Cr-Zr). Облученные образцы анализировались на оптическом профилометре - Zygo New View 7300 и растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6610LV. В этой работе определялись размеры поднятий, и вычислялся их объем. На рис.1 приведена экспериментально полученная зависимость объема поднятия от плотности энергии лазерного импульса для случая воздействия тремя импульсами ($f = 10$ Гц).

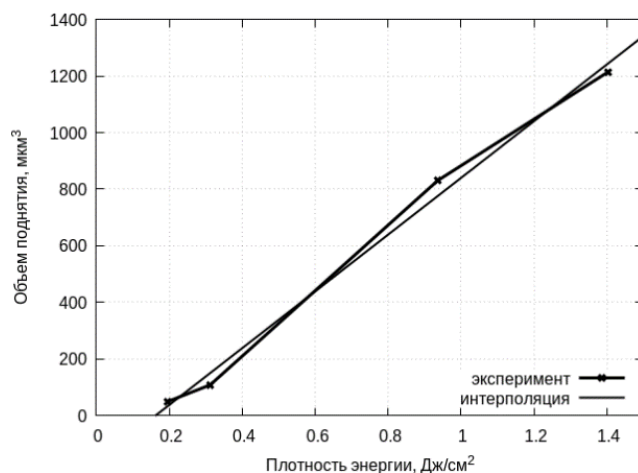


Рис. 1. Зависимость объема поднятия от плотности энергии лазера для образца меди после воздействия тремя импульсами излучения с $\lambda = 355$ нм

При оптикопластическом эффекте наноподнятие формируется при сохранении конденсированного состояния зеркала, за счет пластической деформации нагретого приповерхностного слоя. При быстро нагреве и охлаждении этого слоя наблюдалось движение структурных дефектов – дислокаций и границ зерен. Заметный вклад в массоперенос внесен благодаря генерации избыточного количества точечных дефектов при предплавильных температурах. Межузельные атомы диффундируют на поверхность по механизму Шоттки. В то же время, менее подвижные вакансии видимо остаются в узлах решетки.

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 0057-2019-0005.

Список литературы

1. Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, В.Е. Роголин, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков, И.А. Каплунов, А.И. Иванова // ПЖТФ, 2020, Т. 46, вып. 16. С. 51-54. DOI: 10.21883/PJTF.2020.16.49856.1815.
2. T V Malinskiy, S I Mikolutskiy, V E Rogalin, Yu V Khomich, V A Yamshchikov, I A Kaplunov and A I Ivanova // Journal of Physics: Conference Series 1679, 2020, p. 022055 doi:10.1088/1742-6596/1679/2/022055.
3. Т.В. Малинский, В.Е. Роголин // ЖТФ, 2022, Т. 92, вып. 2, с. 268-273. DOI: 10.21883/JTF.2022.02.52016.225-21.

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ХеС1-ЛАЗЕР ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты разработки и экспериментального моделирования электроразрядного ХеС1 лазера. Установлены зависимости выходных параметров лазера от условий его возбуждения, состава и давления активной среды. Получена генерация сдвоенного лазерного импульса энергией $\sim 1,2$ Дж и полной длительностью ~ 180 нс.

K.F. ZNOSKO

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

ELECTRIC DISCHARGE XeCl LASER FOR PULSED LASER ABLATION OF MATERIALS

The results of the development and experimental simulation of an electric-discharge XeCl laser are presented. The dependences of the output parameters of the laser on the conditions of its excitation, the composition and pressure of the active medium are established. Generation of a dual laser pulse with an energy of ~ 1.2 J and a total duration of ~ 180 ns has been obtained.

В настоящее время широко используются и разрабатываются технологии лазерной обработки материалов. Для этой цели как правило используют CO_2 лазеры и твердотельные лазеры. Однако излучение этих лазеров не все материалы хорошо поглощают. Этого недостатка в значительной степени лишены эксимерные лазеры, излучающие в УФ диапазоне спектра. В работах [1-3] было показано, что применение парных лазерных импульсов (с плотностью мощности $\sim 10^9$ Вт/см²) для обработки материалов приводит к значительному росту выноса массы вещества мишени по сравнению с моноимпульсом. Нелинейный рост выноса материала из кратера объяснялся различными механизмами, в том числе и высокой температурой эрозионного кратера, образованного первым лазерным импульсом в паре. В связи с этим представляет интерес разработать эксимерный лазер с двойным импульсом генерации.

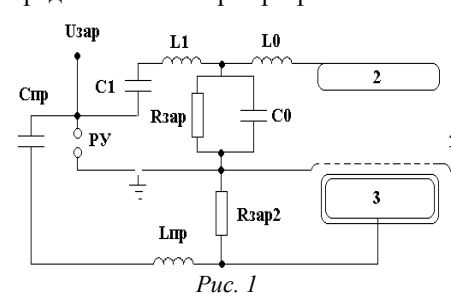


Рис. 1

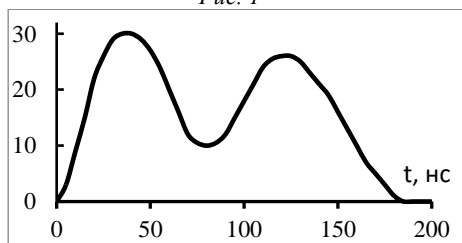


Рис. 2

Для этой цели за основу были взяты результаты разработки и исследования эксимерных лазеров представленные в [4-6]. На базе методик представленных в [7-8] было проведено моделирование генерационных характеристик и параметров разрабатываемого лазера. На рис. 1 представлена схема лазера. Цилиндрическая диэлектрическая лазерная камера изготовлена из полиамида. Ее длина 1100 мм, внутренний диаметр 100 мм. В ней расположены профилированный цельнометаллический анод (2) и пластинчатый перфорированный катод (1) длиной по 920 мм. Катод изготовлен из нержавеющей стали толщиной 0,8 мм на котором в окне 18×880 мм² выполнена перфорация с диаметром отверстий ~ 1 мм и светопропусканием $\sim 50\%$. Межэлектродный промежуток составлял 30 мм, а разрядный объем ~ 400 см³. Предыонизация рабочей смеси производилась излучением барьерного разряда из-под перфорированного катода (1) при подаче напряжения на электрод предыонизации (3). С внешней стороны лазерной камеры располагались конденсаторы обострительной емкости C_0 . К обострительной емкости полосковыми шинами подключался двухступенчатый LC-контур образованный C_1 и L_1 . PY – коммутатор, $R_{зар}$ – зарядные резисторы. Цепь питания предыонизации образована контуром $C_{пр}L_{пр}$. Емкости и индуктивности рассчитаны так,

чтобы ток разряда представлял собой двугорбый импульс. Это обеспечивало генерацию ХеС1-лазером сдвоенного импульса (рис.2). Проведены исследования зависимости выходной энергии лазера от состава и давления рабочей смеси, зарядного напряжения, параметров системы возбуждения разряда. Максимальное значение выходной энергии составляло 1,2 Дж на смеси состава НС1:Хе : Не - 1:15:3000 при давлении 4 атм. и зарядном напряжении 40 кВ. Длительность сдвоенного импульса зависела от параметров цепи и при максимальной энергии составляла ~ 180 нс.

Список литературы

1. Першин С.М. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 1. С. 63–67.
2. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат., фіз., інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 3. С. 100-113.
3. Зноско К.Ф. // Лещик С.Д. Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. 2021. Т. 11, № 1. С. 45-58.
4. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курганский А.Д. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 11. С. 2228–2231.
5. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Володенков А.П. // Журнал прикладной спектроскопии. 1999. Т. 66, №5. С.702-707.
6. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. // Journal of Optical Technology. 2000. V. 67, № 11. P. 961-967.
7. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V. F., Znosko K.F. // Russian Physics Journal. 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.
8. Volodenkov A., Anufrik S., Znosko K. // High Temperature Material Processes. 2017. V.21, No 4. P. 377-390.

ВЛИЯНИЕ ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ТОЛУОЛЕ

Исследованы особенности вынужденного температурного рассеяния при двухфотонном возбуждении толуола излучением второй гармоники неодимового лазера ($\lambda = 530$ нм). Обнаружено неоднородное расширение излучения пучка накачки в фокальной плоскости фокусирующей линзы, обусловленное неоднородностями излучения накачки и особенностями двухфотонного поглощения излучения накачки. Такое неоднородное расширение излучения пучка накачки в фокальной плоскости фокусирующей линзы интерпретируется нами как распад лазерного пучка при двухфотонном ВТР света в толуоле при нестационарном взаимодействии лазерного импульса со средой.

I.G.ZUBAREV, V.F.EFIMKOV, A.A.GORDEEV
P. N. Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

EFFECT OF TWO-PHOTON ABSORPTION OF LIGHT RADIATION DURING PROPAGATION IN TOLUENE

The features of stimulated temperature scattering under two-photon excitation of toluene by the radiation of the second harmonic of a neodymium laser ($\lambda = 530$ nm) are investigated. An inhomogeneous expansion of the radiation spatial structure of the pump beam in the focal plane of the focusing lens is detected due to inhomogeneities of the pump radiation and features of the two-photon absorption of the pump radiation. Such an inhomogeneous expansion of the radiation spatial structure of the pump beam in the focal plane of the focusing lens is interpreted by us as the decay of a laser beam spatial structure at a two-photon STS of light in toluene during the unsteady interaction of the laser pulse with the medium.

Проведено исследование вынужденного температурного рассеяния (ВТР) лазерного импульса при двухфотонном поглощении излучения в толуоле. Излучение накачки **Р** (рис.1) с длиной волны $\lambda = 530$ нм, длительностью импульса $\tau = 30$ нсек и расходимостью $\sim\theta = 3 \times 10^{-4}$ рад формировалось удвоением частоты излучения неодимового лазера ($\lambda = 1060$ нм) и фокусировалось линзой **1** с фокусным расстоянием $f_1 = 3$ см в кювету с толуолом длиной 7 см. Расходимость отраженного от кюветы излучения ВТР на антистоксовой частоте регистрировалась с помощью линзы **2** с фокусным расстоянием 160 см и расположенной в ее фокусе ПЗС-матрицы **3**. Этими же инструментами предварительно измерялась расходимость излучения накачки, которая отражалась расположенным перед кюветой плотным зеркалом. Расходимость излучения накачки, прошедшей кювету измерялась с помощью сложенных вместе линз **4** фокусным расстоянием 7 см и **5** фокусным расстоянием 75 см. При этом линза **4** располагалась софокусно с линзой **1**. В фокусе линзы **5** располагалась ПЗС-матрица **6**. При использовании такой методики измерялись не только расходимости излучений ВТР и накачки, прошедшей кювету (а предварительно и расходимость излучения самой накачки). Измерялись также: а) размер распределения интенсивности расположенной в фокусе линзы **1** области активной среды, излучающей антистоксову компоненту ВТР, б) размер распределения интенсивности расположенной в фокусе линзы **1** области активной среды, через которую прошла накачка, в) размер распределения интенсивности излучения накачки в фокусе линзы **1** для случая линейной среды. Измерения показали, что расходимость антистоксова излучения ВТР близка к дифракционной для пучка излучения ВТР $\sim 2,5$ мм. Ширина неоднородной фоновой компоненты накачки в фокальной плоскости фокусирующей линзы составила 300 – 400 мкм, однако в линейном случае она должна была составить $f_1 \cdot \theta = 14$ мкм. Именно этот результат мы интерпретируем как распад пространственной структуры возбуждающего излучения при ВТР за счёт двухфотонного поглощения накачки в толуоле [1].

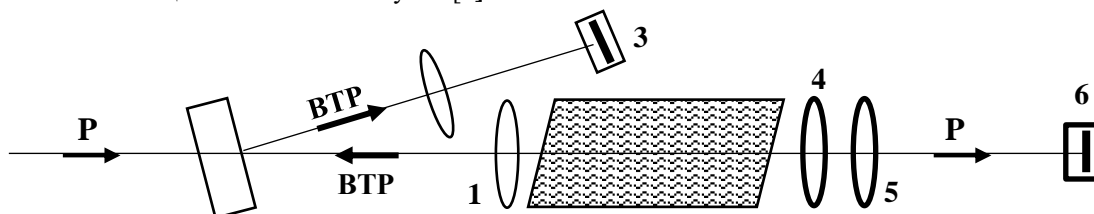


Рис.1. Принципиальная схема эксперимента

Список литературы

1. А.А.Гордеев, В.Ф.Ефимков, И.Г.Зубарев, С.И.Михайлов « Распад лазерного пучка при ВТР света в толуоле в результате двухфотонного поглощения излучения накачки и нестационарного взаимодействия лазерного импульса со средой», Квантовая Электроника, 50, №11, 1078, 2020.

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Получено уравнение для описания двухфотонного поглощения световых пучков переменного поперечного сечения. Показано, что экспериментальные значения коэффициентов двухфотонного поглощения сфокусированных лазерных пучков, рассчитанные в приближении плоских волн в области фокальной перетяжки и при учёте изменяющегося поперечного сечения светового пучка, различаются на два порядка величины.

I.G. ZUBAREV, V.F. EFIMKOV, A.A. GORDEEV
P.N. Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

CALCULATION AND MEASUREMENT OF THE TWO-PHOTON ABSORPTION COEFFICIENT OF LIGHT BEAMS OF VARIABLE CROSS-SECTION

An equation is obtained to describe the two-photon absorption of light beams of variable cross-section. It is shown that the experimental values of the coefficients of two-photon absorption of focused laser beams calculated in the approximation of plane waves in the area of focal region and taking into account the changing cross-section of the light beam differ by two orders of magnitude.

Как известно, коэффициент двухфотонного поглощения зависит от квадрата интенсивности возбуждающего излучения. При фокусировании накачки основное поглощение происходит в области фокальной перетяжки длиной l [1-5], где интенсивность накачки имеет максимальное значение. Поскольку в этой области и волновой фронт возбуждающего излучения является плоским, то для описания происходящих процессов можно использовать плоско – волновое приближение. При учёте реальной переменной поперечной структуры пучка результаты существенно отличаются, по крайней мере, при фокусировке возбуждающего излучения достаточно короткофокусными линзами с числовой апертурой $N \geq 0.1$. В модели плосковолнового приближения эволюция интенсивности возбуждающего излучения описывается известным уравнением с коэффициентом двухфотонного поглощения β . Вводя обозначения I_{in} и I_{out} - интенсивности накачки соответственно входного и выходного излучений и решая уравнение, получаем для коэффициента двухфотонного поглощения выражение $\beta = \frac{1}{I_{in} I_{out}} (\frac{I_{in}}{I_{out}} - 1)$. Используя для накачки наши экспериментальные результаты, получаем в среднем

$\beta_{av} = (2.56 \pm 0.26) \cdot 10^{-10} \frac{CM}{Bm}$. В модели реальных сфокусированных пучков накачки мощность импульсов возбуждающего

излучения по мере распространения по среде не зависит от площади их поперечного сечения. В этом случае возьмём выражение для интенсивности импульса $I(z) = \frac{P(z)}{S(z)}$, где $P(z)$ - мощность светового импульса, $S(z)$ - переменная площадь

его поперечного сечения. Продифференцируем обе части этого равенства, и учтем потери за счет двухфотонного поглощения. В итоге получим $\frac{dI}{dz} = \frac{1}{S(z)} \frac{dP}{dz} - \frac{P}{S^2} \frac{dS}{dz} = \beta I^2 = -\frac{\beta}{S^2} P$. Умножая все слагаемые этого равенства, содержащие P

, на S , получим уравнение $\frac{dP}{dz} - \frac{P}{S} \frac{dS}{dz} = -\frac{\beta}{S} P^2$. Взяв для S выражение для площади гауссова пучка, данное уравнение

можно привести к классическому виду уравнения Бернулли, решая которое и используя наши экспериментальные данные, получаем для среднего значения коэффициента двухфотонного поглощения выражение $\beta_{av} = (2.32 \pm 0.30) \cdot 10^{-8} \frac{CM}{Bm}$, т.е. на два порядка больше [6].

Список литературы

1. He G.S., Law W., Zhang X., Prasad P.N., Appl.Phys.Lett., 101, 011110 (2012).
2. He G.S., Law W., Baev A., Lin S., Swihart M.T., Prasad P.N., J.Chem.Phys., 138,024202 (2013).
3. Shi I., Wu H., Yan F., Yang J., He Y., J.Nanopart.Res., 18, 23 (2016).
4. Averyushkin A.S., Bulychev N.A., Efimkov V.F., Erokhin A.I., Kazaryan M.A., Mikhailov S.I., Saraeva I.N., Zubarev I.G., Laser Phys., 27, 055401(2017).
5. А.А.Гордеев, В.Ф.Ефимков, И.Г.Зубарев, С.И.Михайлов, Квант. Электр. 50, №11, стр. 1078, 2020.
6. А.А.Гордеев, В.Ф.Ефимков, И.Г.Зубарев «Двухфотонное поглощение световых пучков переменного поперечного сечения», Квантовая Электроника, 51, №7, 619, 2021.

Н.А. ИНОГАМОВ^{1,2}, В.В. ЖАХОВСКИЙ², Ю.В. ПЕТРОВ¹, В.А. ХОХЛОВ¹, В.В. ШЕПЕЛЕВ³,
С.В. ФОРТОВА³, Е.А. ПЕРОВ⁴

¹Институт теоретической физики им. Ландау РАН, Черногловка, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Духова Росатом, Москва, Россия

³Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, Россия

⁴Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОИЗВОДСТВО НАНОЧАСТИЦ И УПРОЧНЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Доклад посвящен физике взаимодействия лазерного излучения с веществом. Анализируются два случая, представляющие большой интерес для современных приложений. Во-первых, это наработка наночастиц при абляции в жидкость. Во-вторых, это анализ формирования, распространения и затухания ударной волны при лазерном воздействии на металл. Определена глубина области, в которой могут сохраниться остаточные деформации и напряжения. Доклад опирается на материалы статей [1,2].

N.A. INOGAMOV^{1,2}, V.V. ZHAKHOVSKY², Y.V. PETROV¹, V.A. KHOKHLOV¹, V.V. SHEPELEV³,
S.V. FORTOVA³, E.A. PEROV⁴

¹The Landau Institute for Theoretical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

²Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automation, Rosatom, Moscow, Russia

³Institute of Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences (ICAD RAS), Moscow, Russia

⁴Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

LASER TECHNOLOGY: NANOPARTICLE PRODUCTION AND SHOCK PEENING

The report is devoted to the physics of interaction of laser radiation with matter. Two cases of great interest for modern applications are analyzed. Firstly, this is the generation of nanoparticles during ablation into a liquid. Second, it is the analysis of formation, propagation, and attenuation of a shock wave during laser action on metal. The depth of the area in which residual deformations and stresses may persist is determined. The report is based on the articles [1,2].

Проведено численное моделирование абляции в жидкость. Применены коды молекулярной динамики и гидродинамики. Лазерное излучение проходит через прозрачную жидкость и освещает металлическую мишень. Происходит поглощение и отражение света от мишени. Рассмотрен диапазон поглощенных энергий Fabs порядка 1 Дж/см², представляющий интерес для технологий: ниже этих значений образуется мало наночастиц в расчете на один лазерный импульс, выше – оптический пробой жидкости. Развита теория, которая с помощью данных моделирования и термодинамической информации (уравнения состояния вещества) позволяет оценить массу и состав наночастиц, сформированных лазерным воздействием [1].

Мощное лазерное воздействие вызывает необратимые изменения в кристаллической структуре мишени. Эти изменения лежат в основе технологий лазерного пининга (laser shock peening, LSP). В работе исследуются процессы, определяющие толщину слоя остаточных деформаций и связанных с ними остаточных напряжений. Известно, что прекращение пинингования связано с затуханием лазерной ударной волны. В работе получены новые сведения относительно того, каким образом протекает трансформация волны из упругопластического в упругий режим распространения в случае пикосекундного воздействия. Упругая волна бесполезна для пининга. Оказывается, во время трансформации исчезает классическая конфигурация с пластическим скачком и упругим предвестником перед ним. При этом передний край расширяющегося пластического слоя постепенно снижает свою скорость ниже объемной скорости звука, размазывается внутри волны разрежения и останавливается [2].

Список литературы

1. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А. // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. № 1. С. 20.
2. Иногамов Н.А., Перов Е.А., Жаховский В.В., Шепелев В.В., Петров Ю.В., Фортова С.В. // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. № 2. С. 80.

Э.Д. ИШКИНЯЕВ^{1,2}, Е.В. ХРИПТОВИЧ^{1,3}, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ², И.Н. ШИГАНОВ³

¹ООО Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полус», Фрязино, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАДАННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ СКАНИРУЮЩИМ ЛУЧОМ

В работе рассмотрены методы создания заданного энергетического распределения на плоских и неплоских поверхностях при обработке металлических материалов сканирующим лазерным лучом с переменной мощностью излучения. Показаны возможности и преимущества использования сканирующей оптики для однородного модифицирования приповерхностного слоя.

E.D. ISHKINYAEV^{1,2}, E.V. KHRIPTOVICH^{2,3}, V.N. PETROVSKIY², I.N. SHIGANOV³

¹IPG IRE-Polus, Fryazino, Russia

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

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

OBTAINING A GIVEN ENERGY DISTRIBUTION DURING LASER SURFACE PROCESSING WITH A SCANNING BEAM

The paper considers methods for creating a given energy distribution on flat and non-planar surfaces during the processing of metallic materials by a scanning laser beam with a variable radiation power. The possibilities and advantages of using scanning optics for uniform modification of the near-surface layer are shown.

В большинстве задач лазерного поверхностного модифицирования изделий, таких как закалка, легирование, наплавка и др. требуется создание равномерного температурного распределения при воздействии излучения. Для этого проектируются оптические системы, позволяющие переформировать входной гауссовый пучок в оптимальное для термической обработки распределение интенсивности в поперечном сечении путем изменения формы преломляющих линз или использования дифракционных оптических элементов [1,2]. Однако, такие системы не обладают достаточной гибкостью в адаптации к различным изделиям, так как не позволяют изменять размеры пятна с сохранением профиля интенсивности.

Использование сканирующей оптики и волоконных лазеров производства IPG Photonics позволяет производить обработку со скоростями более 10 м/с с возможностью изменения мощности излучения за короткий промежуток времени. Производя обработку осциллирующим лучом с частотой порядка десятков Гц, можно создавать равномерный тепловой фронт с минимальными колебаниями температуры в области сканирования вследствие инертности теплопроводности [3]. При этом изменяя амплитуду осцилляций, скорость движения луча, мощность излучения в процессе сканирования, можно создавать энергетический вклад практически с любым распределением по площади.

В работе представлена методика численного моделирования процесса обработки сканатором, расчет интегральной интенсивности при сканировании с изменяющимися технологическими параметрами и температурных полей в процессе воздействия. Интегральная интенсивность за период осцилляции рассчитывается по следующей формуле:

$$I(t_n, x, y) = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} \frac{2P(t)}{\pi D^2} \exp\left(-8 \frac{(x - x_0 - V_{||}t)^2 + (y - y_0 - \int V_{\perp} dt)^2}{D^2}\right) dt,$$

где $P(t)$ – функция мощности излучения по времени, D – диаметр пятна излучения на поверхности, (x_0, y_0) – начальная координата луча, $V_{||}$ – продольная скорость движения оптической системы, V_{\perp} – скорость осцилляции луча, t_n – период осцилляции. Если частота осцилляции достаточна, чтобы можно было пренебречь изменением температуры в какой-либо точке области воздействия за период осцилляции, то сканирование поверхности с $I(t_n, x, y)$ приводит к такому же температурному распределению как в случае воздействия статическим лучом с аналогичным распределением плотности мощности. Таким образом изменяя технологические параметры сканирования, можно создавать заданное распределение энергии на поверхности обрабатываемого изделия для получения необходимого температурного распределения без использования дополнительных преобразующих интенсивность в пучке оптических элементов.

Список литературы

1. Klocke F. Optimization of the laser hardening process by adapting the intensity distribution to generate a top-hat temperature distribution using freeform optics / F. Klocke, M. Schulz, S. Gräfe // Coatings. – 2017. – Vol. 7. – № 6.
2. Analytical heat conduction modelling for shaped laser beams / J. Sundqvist [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 247. – 2016. – P. 48-54.
3. Customized laser beam intensity distribution for the laser surface treatment of geometrically convoluted components / P. Sancho [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 263. – № December 2017. – P. 223-232.

Е.И. КАЗАНЦЕВ², В.В. ВАСИЛЬЕВ¹, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ¹, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2},
С.А. ЗИБРОВ¹, Д.С. ЧУЧЕЛОВ¹

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБ ИЗМЕРЕНИИ АМПЛИТУДЫ СВЧ МОДУЛЯЦИИ ТОКА НАКАЧКИ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ

Высокочастотная гармоническая модуляция тока однодиодных лазеров широко применяется в метрологии и спектроскопии. Представлен метод измерения амплитуды модуляции тока по сдвигу частоты излучения из-за разогрева активной области лазера.

E.I. KAZANTSEV², V.V. VASSILIEV¹, M.I. VASKOVSKAYA¹, V.L. VELICHANSKY^{1,2},
S.A. ZIBROV¹, D.S. CHUCHELOV¹

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

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

THE MEASUREMENT OF MICROWAVE-MODULATION AMPLITUDE OF A DIODE LASER PUMPING CURRENT

The microwave harmonic modulation of single mode diode lasers is widely used in metrology and spectroscopy. We propose to determine the amplitude of current modulation via frequency shift induced by heating of the laser active region.

В исследованиях спектров диодных лазеров (ДЛ) в режиме СВЧ модуляции, приводятся зависимости спектров от мощности модулирующего СВЧ сигнала [1,2]. Чаще всего это мощность на выходе СВЧ генератора. Однако не вся эта мощность поступает в ДЛ из-за потерь в цепи. Между тем, для теории важна амплитуда модуляции тока [3]. Ее можно определять, сопоставляя сдвиги частоты генерации лазера из-за нагрева при изменении мощности СВЧ и неизменной постоянной составляющей тока; и при изменении постоянной составляющей тока (без СВЧ).

При постоянном токе накачки (I_0) выделяемая тепловая мощность $Q_0 = I_0^2 R + (I_0 - I_n) U_{pn} (1 - \eta) + I_n U_{pn}$, где I_n – пороговый ток, R – омическое сопротивление лазера, U_{pn} – напряжение на р-п переходе, η – дифференциальная эффективность, $(I_0 - I_n) U_{pn} \eta$ – доля мощности, вышедшей в виде излучения. Нетрудно показать, при модуляции тока $I(t) = I_0 + \delta I \cos \omega t$, усредненная тепловая мощность равна $\langle Q \rangle = Q_0 + R \delta I^2 / 2$.

Таким образом, с ростом мощности СВЧ и амплитуды модуляции тока происходит дополнительное стационарное выделение тепловой мощности в лазере $\Delta Q = R \delta I^2 / 2$, что вызывает увеличение температуры $\Delta T = k_1 \Delta Q$ и уменьшение частоты $\Delta \nu = |k_2| \Delta T = |k_2| k_1 \Delta Q = |k_2| k_1 R \delta I^2 / 2 = K \delta I^2$, где положено $K = R |k_2| k_1 / 2$ (смысл k_1 и k_2 ясен из формул).

Зависимость приращения частоты от постоянной составляющей тока при постоянном его приращении $|\Delta \nu| = f(I_0) \Big|_{\Delta I = const}$ имеет вид $|\Delta \nu| = f(I_0) = |k_2| k_1 \Delta Q = |k_2| k_1 [2 I_0 \Delta I R + \Delta I^2 R + \Delta I U_{pn} (1 - \eta)]$, а ее производная $f'(I_0) = df(I_0)/dI_0 = |k_2| k_1 2 \Delta I R = 4 K \Delta I$. Т.о., K находится из соотношения $K = f'(I_0) / 4 \Delta I$. Сдвиги частоты определяются по смещению резонансов пропускания интерферометра. На Рис 1 приведена зависимость $|\Delta \nu| = f(I_0)$, по наклону которой определен калибровочный коэффициент $K = 12,4$ для лазера Philips ULM-795.

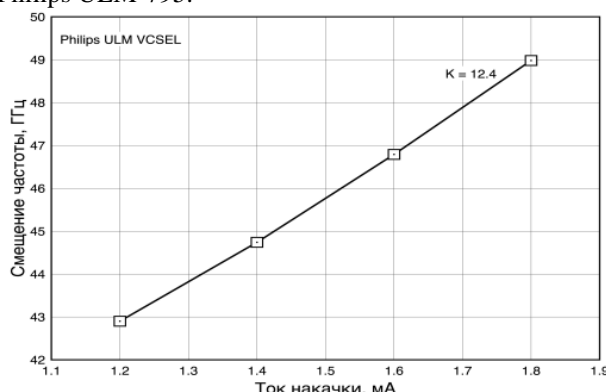


Рис.1. Зависимость смещения частоты генерации от тока для лазера Philips ULM 795 0 при $\Delta I = 2 \text{ mA}$.

Измеряя $\Delta \nu$ по смещению резонансов интерферометра и зная K , находим искомую амплитуду: $\delta I = (\Delta \nu / K)^{1/2}$. Представленный метод измерения амплитуды СВЧ модуляции тока ДЛ будут использован в развитие работы [3] при исследовании модуляционных спектров с теоретическими для большой глубины модуляции.

Список литературы

1. Waxman. M., et al. // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 2009. V. 95. P. 301.
2. Zibrov S.A., et al. // IEEE Journal of Quantum Electronics 2020. V. 56. (2000607) P. 1.
3. Васьковская М.И., А.П. Богатов и др. // Квантовая Электроника. 2017. 47. P. 835.

С.Ф. УМАНСКАЯ¹, М.А. ШЕВЧЕНКО¹, А.Д. КУДРЯВЦЕВА¹, М.А. КАРПОВ¹, Н.В. ЧЕРНЕГА¹,
А.Н. МАРЕСЕВ¹, К.И. ЗЕМСКОВ¹, А.И. ВОДЧИЦ²

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

²Институт Физики им. Б.И. Степанова НАНБ, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛУЧАЙНОЙ РАМАНОВСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ

Представлены результаты исследования энергетических и температурных зависимостей интенсивности компонент вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР) в порошке, состоящем из субмикронных частиц нитрата бария, при возбуждении нано- и пикосекундными лазерными импульсами. Показано, что при пикосекундном возбуждении интенсивность ВКР растет с понижением температуры и перераспределяется в пользу компонент более высокого порядка.

S.F. UMANSKAYA¹, M.A. SHEVCHENKO¹, A.D. KUDRYAVTSEVA¹, M.A. KARPOV¹,
N.V. TCHERNIEGA¹, A.N. MARESEV¹, K.I. ZEMSKOV¹, A.I. VODCHITS²

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

²B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

INVESTIGATION OF CONVERSION EFFICIENCY TEMPERATURE DEPENDENCE OF RAMAN RANDOM LASING

The results of a study of the energy and temperature dependences of the stimulated Raman scattering (SRS) components intensity in a powder consisting of submicron barium nitrate particles upon excitation by nano- and picosecond laser pulses are presented. It is shown that, under picosecond excitation, the SRS intensity increases with decreasing temperature and is redistributed in favor of higher-order components.

Случайные лазеры – это системы, использующие сильно разупорядоченные материалы для получения лазерной генерации. В рамановских случайных лазерах в качестве источника усиления используется вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР). В нашей работе экспериментально исследовано ВКР в порошке нитрата бария $Ba(NO_3)_2$. Эксперименты проводились в двух временных режимах: стационарном, когда длительность импульса накачки намного больше, чем время дефазировки колебательной рамановской моды (в этом случае для возбуждения использовались лазерные импульсы длительности 11 нс) и нестационарном, когда длительность импульса накачки меньше времени дефазировки, а спектральная ширина лазерной накачки намного больше однородного уширения рамановской линии (в этом случае ВКР возбуждалось лазерными импульсами длительности 30 пс). Температура образцов изменялась от комнатной до температуры жидкого азота. Исследование энергетической зависимости компонент ВКР показало, что в порошке нитрата бария, в отличие от кристаллического $Ba(NO_3)_2$, порог ВКР при пикосекундном возбуждении значительно ниже, эффективность преобразования в рассеянное излучение значительно выше и число компонент ВКР больше, чем при наносекундном возбуждении. При пикосекундном возбуждении понижение температуры приводит к существенному росту интенсивности ВКР и ее перераспределению в пользу компонент более высокого порядка, а также к уменьшению ширины линии. В наносекундном режиме также наблюдался рост интенсивности первой стоксовой компоненты ВКР с понижением температуры, но он происходил медленнее, чем в пикосекундном режиме. Аналогичная температурная зависимость наблюдалась для кристаллов кварца в работе [1], а также в работе [2], авторы которой получили случайный рамановский лазер с органическим материалом (природной волокнистой целлюлозой моркови) в качестве активного вещества.

В случае пикосекундной длительности импульса накачки исследовалась временная динамика ВКР с помощью монохроматора и стрик-камеры. Полученные экспериментально длительности компонент ВКР хорошо согласуются с расчетами методом Монте-Карло для эффекта случайной рамановской генерации в $BaSO_4$ [3] за исключением одного момента. С увеличением энергии накачки 1-я стоксова компонента линейно сдвигается во времени относительно лазерного импульса. Обнаруженный эффект влияния энергии накачки на время задержки первой стоксовой компоненты может быть использован для измерения нелинейных параметров среды. Оптимизация режима накачки, наряду с охлаждением образцов, позволяет более чем на порядок повысить эффективность случайной ВКР-генерации в неупорядоченных ВКР-средах. Максимальная эффективность преобразования ВКР в порошке нитрата бария достигала 30% при температуре жидкого азота.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант 20-52-00002-Bel_a) и БРФФИ (Грант (Ф20Р-013).

Список литературы

1. Sokolovskaya, A. I., Kudryavtseva, A. D., Brekhovskikh, G. L., & Sushchinskii, M. M. Effect of temperature on stimulated Raman scattering light in substances with various Kerr constants. *Sov. Phys.-JETP*. 30, 633-636 (1969).
2. Venkata Siva Gummaluri, Krishnan, S.R., & Vijayan, C. Stokes mode Raman random lasing in a fully biocompatible medium. *Optics Letters*, 43(23), 5865-5868 (2018).
3. Hokr, B.H., Bixler, J.N. & Yakovlev, V.V. Higher order processes in random Raman lasing. *Appl. Phys. A* 117, 681–685 (2014).

И.О. КИНЯЕВСКИЙ¹, А.В. КОРИБУТ¹, Я.В. ГРУДЦЫН¹, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ¹, В.И. КОВАЛЕВ¹, Д.В. ПУШКАРЕВ¹, Е.Э. ДУНАЕВА², А.А. ИОНИН¹

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ТИТАН САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В РАЙОН ДЛИНЫ ВОЛНЫ 11 МКМ С ПОМОЩЬЮ ВКР ВаWO₄ И ГРЧ LiGaS₂ КРИСТАЛЛОВ

Экспериментально продемонстрирована конверсия частоты chirпированного и растянутого до 200 пс импульса титан-сапфирового лазера (исходная длительность 50 фс) в средний ИК-диапазон путем его последовательного преобразования в кристаллах ВаWO₄ и LiGaS₂. Эффективность генерации лазерных импульсов на длине волны 11,1 мкм составляла 10⁻³%.

I.O. KINYAEVSKIY¹, A.V. KORIBUT¹, YA.V. GRUDTSYN¹, L.V. SELEZNEV¹, V.I. KOVALEV¹, D.V. PUSHKAREV¹, E.E. DUNAEVA², A.A. IONIN¹

¹P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
²Prokhorov general physics institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

FREQUENCY CONVERSION OF FEMTOSECOND TITANIUM SAPPHIRE LASER EMISSION TO WAVELENGTH OF 11 MICRON WITH SRS BaWO₄ AND DFG LiGaS₂ CRYSTALS

The frequency down-conversion of a chirped and stretched to 200 ps pulse of a titanium-sapphire laser (initial duration 50 fs) into the mid-IR range by successive conversion in BaWO₄ and LiGaS₂ crystals is experimentally demonstrated. The generation efficiency of laser pulses at a wavelength of 11.1 μm was 10⁻³%.

Разработка лазерных источников, излучающих ультракороткие лазерные импульсы среднего ИК-диапазона, представляет большой интерес для развития ряда фундаментальных и прикладных направлений. При этом одним из наиболее успешных методов генерации таких импульсов является оптическое выпрямление или генерация разностной частоты (ГРЧ) излучения надежных твердотельных лазеров ближнего ИК диапазона [1].

Мы разработали твердотельную лазерную систему среднего ИК-диапазона, состоящую из титан-сапфирового лазера ближнего ИК-диапазона, ВКР-активного кристалла ВаWO₄ и нелинейного кристалла LiGaS₂. В этой системе лазерный импульс с длительностью 50 фс, длиной волны 0,75 мкм и энергией до 6 мДж растягивался во времени до 200 пс в оптическом стретчере и направлялся в кристалл ВаWO₄. В кристалле ВаWO₄ за счёт ВКР эффекта генерировался импульс, смещенный от импульса накачки в стоксовую сторону на ~900 см⁻¹. Полученный двух-частотный импульс (основная частота лазера и его стоксовая компонента, генерируемая в ВаWO₄) направлялся в нелинейный кристалл LiGaS₂, в котором методом ГРЧ происходила генерация лазерного импульса среднего ИК-диапазона. Полная эффективность преобразователя частоты составляла 10⁻³% при эффективности ВКР преобразователя 3%. Лазерный импульс среднего ИК-диапазона имел центральную длину волны 11,1 мкм, ширина спектра по полувысоте ~0,2 мкм (Рис. 1), что соответствует длительности спектрально ограниченного импульса ~0,9 пс.

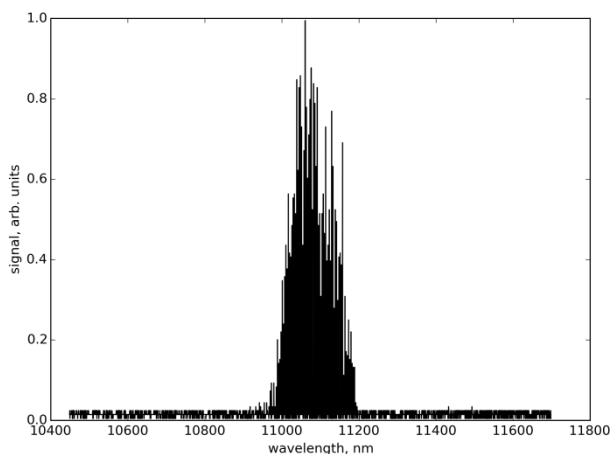


Рис. 1. Спектр лазерного импульса среднего ИК-диапазона.

Список литературы

1. Piresa H., Baudischa M., Sanchez D. et. al. // Prog. Quant. Electr. 2015. V. 43, P. 1

Я.А. КОВАЛЁВА

Институт Механики Металлополимерных Систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ПО РАЗМЕРАМ, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Изучено распределение частиц политетрафторэтилена, полученных путем лазерной абляции при использовании CO₂-лазера с непрерывным излучением, по размерам. Показано, что образование мелкой фракции связано с большой скоростью вылета частиц – около 200 м/с.

YA.A. KAVALIOVA

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Science of Belarus, Gomel, Belarus

DISTRIBUTION OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE PARTICLES BY SIZE OBTAINED BY LASER ABLATION

The size distribution of polytetrafluoroethylene particles obtained by laser ablation using a CO₂ laser with continuous radiation has been studied. It is shown that the formation of a fine fraction is associated with a high velocity of departure of particles - about 200 m/s.

Путем лазерной абляции политетрафторэтилена были получены диски с явным распределением частиц по скоростям и размерам [1]. Данная работа подтверждает размеры частиц, полученных теоретически [1,2]. На дисках по изображениям, полученным с помощью микроскопа на участках 3,5x2,5 см (50% от области попадания основной массы частиц), было сделано разделение на большую и мелкую фракцию. В графических программах, например, Adobe Photoshop, вручную рассчитывались длина и ширина частиц с пересчетом из пикселей в микрометры. Таким образом получается распределение частиц по размерам на небольших областях исследуемых дисков, с разделением на крупную и мелкую фракции. Так как множество частиц имеют одинаковые размеры (особенно мелкая фракция), можно сделать предположение, что на оставшихся областях дисков размеры будут такие же. На рис. 1 представлены распределения размеров частиц, крупной и мелкой фракции, политетрафторэтилена, полученных путем лазерной абляции.

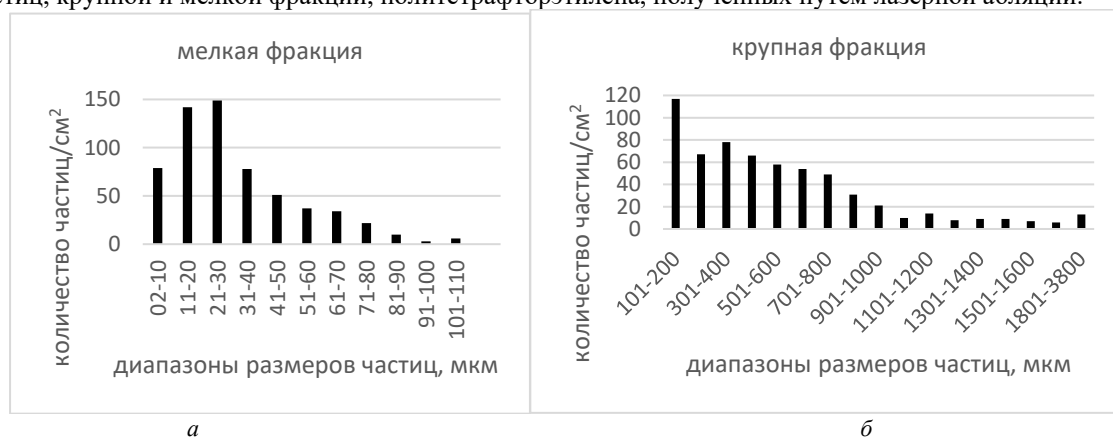


Рис. 1. Распределение количества частиц по размерам: а - мелкой фракции, б - крупной фракции.

Из полученных распределений видно, что основной размер частиц, исходя из их количества, для мелкой фракции лежит в диапазоне 2-40 мкм, для крупной фракции данный диапазон составляет – 100-800 мкм. Все полученные значения подтверждают ранее сделанные теоретические оценки размеров частиц для определенных скоростей.

По оценкам и вычислениям из предыдущих работ [2] показано, что мелкая фракция частиц разгоняется до скорости 200 м/с, а более крупная фракция летит со скоростями от 10 до 60 м/с (основная масса частиц имеет скорость 30-60 м/с). Скорость вылета частиц связана с энергией импульса и длиной волны излучения. Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение энергии в импульсе и уменьшение длины волны лазерного излучения способствуют образованию более крупных частиц. Обратная зависимость приводит к увеличению скорости вылета и образованию мелких частиц.

Список литературы

1. П. Н. Гракович, Л.Ф. Иванов, Л.А. Калинин, Я.А. Ковалёва, В.М. Макаренко, В.Ю. Шумская, Е.М. Толстопяттов Формирование пористых слоёв политетрафторэтилена путём лазерной абляции/ Взаимодействие излучения с твёрдым телом: материалы 14 Международной конференции, Минск, 21-24 сентября 2021 / Белорусский Государственный Университет. – Минск, 2021. – С. 47-52.
2. П. Н. Гракович, Л. Ф. Иванов, Л. А. Калинин, И. Л. Рябченко, Е. М. Толстопяттов, А. М. Красовский Лазерная абляция политетрафторэтилена. Российский химический журнал (журнал российского химического общества имени Менделеева) 2008; (№3) – С. 97-105

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

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

ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В УСИЛИТЕЛЯХ 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. ZOLOTOVSKII, V. A. LAPIN, D. I. SEMENTSOV

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

GENERATION OF FREQUENCY-MODULATED WAVE PACKETS IN AMPLIFIER WITH A TRAVELING REFRACTIVE INDEX WAVE

The conditions for frequency modulation, spectral broadening, and amplification of a Gaussian pulse propagating in an active fiber with a running wave of the refractive index are investigated.

Если свет вводится в волновод под некоторым углом к образующей цилиндра, то поверхностная волна распространяется по спиральной траектории [1].

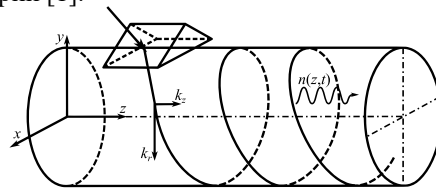


Рис. 1. Траектория луча в цилиндрическом световоде, вводимого через призму и представляющего волну типа МШГ [1, 2].

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

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

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]:

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

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

На рис. 2 приводятся зависимости огибающей (**a**) и мгновенной частоты (**b**) на выходе из световода с оптической длиной пути $L = 500$ м спектрально ограниченного гауссового импульса при начальной длительности $\tau_0 = 10^{-11}$ с, мощности $P_0 = 10$ Вт кривая (0), ДГС $d_2 = -10^{-26}$ с²/м, параметре нелинейности $R = 10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹ – кривые (1–3), параметре усиления среды $g(\omega) = g_0 [1 + (\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega_L^2]^{-1}$, $g_0 \approx 10^{-2}$ м⁻¹, $\Delta\omega_L = 10^{11}$ с⁻¹.

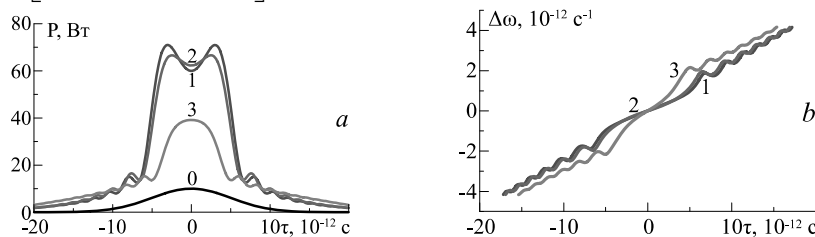


Рис. 2. Динамика огибающей (**a**) и мгновенной частоты (**b**) импульса на выходе из световода с БВПП при $R = 10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹ – кривые (1–3).

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

Список литературы

1. В. П. Торчигин // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 12, С. 1089–1094.
2. И.О. Золотовский, Д.А. Коробко, В.А. Лапин, Д.И. Семенов // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 121, № 2, С. 277–284.
3. I. O. Zolotovskii et al. // JOSAB V. 36, No. 10, P. 2877–2883.

УСИЛЕНИЕ И КОМПРЕССИЯ ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ В АКТИВНОМ НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ

Исследуется динамика распространения частотно-модулированного импульса, распространяющегося в активном световоде с профилем зависимости дисперсии, специально подобранным для обеспечения максимальных степеней сжатия.

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

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

AMPLIFICATION AND COMPRESSION OF FREQUENCY MODULATED PULSES IN AN ACTIVE INHOMOGENEOUS FIBER

The dynamics of propagation of a frequency-modulated pulse propagating in an active fiber with a dispersion profile specially selected to ensure maximum compression ratios is investigated.

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = gA \tag{3}$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр нелинейности, g – коэффициент усиления (потерь) в волокне.

В работе выбиралась зависимость дисперсии вида:

$$d_2(z) = -|d_{20}| \exp \left[-\frac{\alpha_0 |d_{20}|}{g_0} (\exp(2g_0 z) - 1) + 2g_0 z \right] \tag{4}$$

На рис. 1 приведены: динамика ДГС(1, **a**) и пиковой мощности(2, **a**), профили импульса на входе (1, **b**), в точке максимума модуля дисперсии (2, **b**), на выходе из световода (3, **b**) длиной $L = 1.5z_0$, где z_0 – точка максимума модуля дисперсии. В работе рассматривался частотно модулированный импульс вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(\tau / \tau_0) \exp(i\alpha_0 \tau^2) \tag{5}$$

Приведенные зависимости получены путем численного решения уравнения **Ошибка! Источник ссылки не найден.** методом SSF [1]. При следующих значениях параметров импульса: начальная длительность $\tau_0 = 10^{-11}$ с, мощность $P_0 = 0.01$ Вт, chirp $\alpha_0 = 10^{24}$ с⁻²; и световода: ДГС $d_2 = -10^{-27}$ с²/м, параметр нелинейности $R = 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹, усиления: $g_0 = 0.1$ м⁻¹. Видно, как по мере распространения импульса по участку волокна с возрастающей по модулю дисперсией и постоянным усилением наблюдается его незначительное временное сжатие, при, значительном (более чем в 100 раз) усилении. Затем на участке с убывающей по модулю ДГС происходит резкое сжатие импульса. При выбранных параметрах достигается увеличение пиковой мощности более чем на 5 порядков.

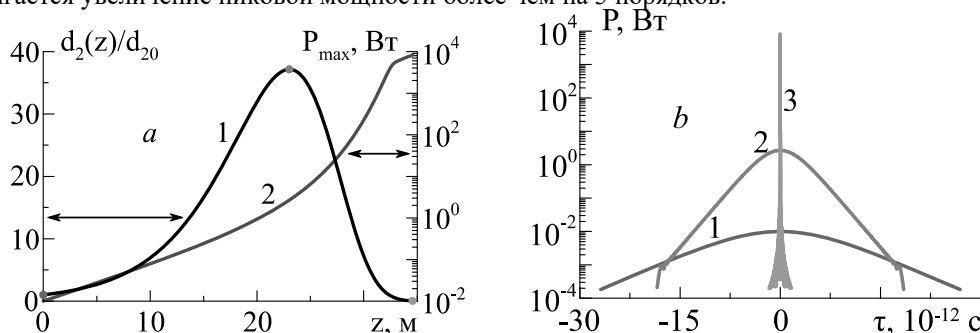


Рис. 1. Динамика ДГС(1, **a**), пиковой мощности(2, **a**) и профили импульса на входе (1, **b**), в точке максимума модуля дисперсии (2, **b**), на выходе из световода (3, **b**).

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

Список литературы

1. И. О. Золотовский, В. А. Лапин, Д. И. Семенцов, Д. А. Столяров // Оптика и спектроскопия. – 2017. – Т. 122, № 3. – С. 490–497.
2. I. O. Zolotovskii, V. A. Lapin, D. I. Sementsov, A. A. Fotiadi, S. V. Popov // Optics Communications. – 2018. – V. 426. – P. 333–340.

А.В. ЛАСТОВСКИЙ^{1,2}, И.С. ШАРАПОВ², Е.М. АЛЕКСЕЕВА², Я.И. КИМ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²АО «НИИ НПО «ЛУЧ», Подольск, Россия

РАЗРАБОТКА СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ МИКРО СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Проведен анализ областей применения технологии микро селективного лазерного плавления (microSLM), проанализированы различные источники лазерного излучения для достижения параметров, необходимых для корректной и точной работы технологии microSLM. Разработана принципиальная оптическая схема двухосевой и трехосевой сканирующей головки для microSLM, а также проведен выбор и обоснование оптической схемы сканирующей головки для дальнейших опытно-конструкторских работ.

A.V. LASTOVSKY^{1,2}, I.S. SHARAPOV², E.M. ALEKSEEVA², YA.I. KIM²

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

²JSC «Research Institute NPO «LUCH», Podolsk, Russia

DEVELOPMENT OF A SCANNING LASER HEAD FOR MICRO SELECTIVE LASER MELTING

The analysis of the fields of application of micro selective laser melting (microSLM) technology has been carried out, various sources of laser radiation have been analyzed to achieve the parameters necessary for the correct and accurate operation of microSLM technology. A basic optical scheme of a two-axis and three-axis scanning head for microSLM has been developed, and the selection and justification of the optical scheme of the scanning head for further development work has been carried out.

Технология микро селективного лазерного плавления (microSLM) позволяет удовлетворить потребность в повышении разрешения печати, что позволяет создавать точные компоненты уменьшенных размеров, а также малогабаритные устройства с высокой функциональностью, которые находят свое применение в различных промышленных отраслях, начиная аэрокосмической и автомобильной, заканчивая биомедицинской и химической.

Имеющиеся исследования в области microSLM успешно демонстрируют возможность изготовления элементов с микромасштабным разрешением на различных материалах, включая полимеры, керамику и металлы. Современные исследовательские системы microSLM обеспечивают разрешение изображения 15 мкм, в то время как коммерческие системы достигли размера фокального пятна в 20 мкм, что не является пределом. Настоящее исследование показало целесообразность изготовления и применения установки microSLM с размером фокального пятна в 10 мкм.

Оценка показывает, что диаметр фокального пятна дифракционного качества прямо пропорционален длине волны излучения, соответственно для уменьшения размеров пятна до необходимого, нужно подобрать источник лазерного излучения с как можно меньшей длиной волны. Оптимальной длиной волны была признана величина 532 нм. Использование данной длины волны позволит увеличить конечную плотность мощности излучения, так как максимумы поглощающей способности большинства интересующих материалов смещены в видимую область спектра.

В ходе работы были разработаны четыре двухосевые оптические системы с различными вариантами объективов: два объектива, приближенных к телецентрическому, F- Θ – объективом, и телецентрическим объективом. Также была разработана трехосевая оптическая система для сканирующей головки microSLM. В результате проведенного анализа сначала была отобрана наилучшая двухосевая оптическая система, которой оказалась сканирующая головка с F- Θ – объективом. Данная система наилучшим образом обеспечивает выполнение критических требований к размерам пятна в плоскости фокусировки лазерного излучения. Схема с F- Θ – объективом обеспечивает радиус в пятна в центре 3,5 мкм, а на краю поля 3,6 мкм. Для данной системы, а также для трехосевой, была разработана принципиальная оптическая схема и конфигурация системы сканирующих зеркал.

Для дальнейшей проработки сканирующего устройства microSLM была выбрана трехосевая компоновка системы. Данная схема обеспечивает радиус пятна в центре 2,7 мкм, а на краю поля 4,2 мкм. Основным критерием для выбора стала технологичность изготовления элементов и эксплуатационные качества конечного изделия. Трехосевая сканирующая головка позволяет в процессе работы легко менять параметры пятна излучения для оптимизации технологического процесса 3D печати. С точки зрения изготовления, фокусирующий объектив трехосевой системы является простым, т.к. имеет три сферические линзы одинакового диаметра 60 мм. Во всех двухосевых вариантах исполнения сканирующей головки объективы имеют, как минимум, пять линз разного диаметра доходящих до 100 мм и расстоянию между линзами менее 1 мм. Еще одним достоинством трёхосевой системы является больший задний фокальный отрезок, следовательно, плоскость фокусировки излучения расположена дальше от сканирующей головки, т.е. она будет меньше подвержена воздействию загрязнения продуктами эрозийного факела.

А.А. ЛИСКОВИЧ

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ NI-CR СПЛАВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Экспериментально показано, что воздействие лазерного излучения на поверхность Ni-Cr мишени, находящейся при температуре 700-1100°C, приводит к росту аблированной массы и более чем двухкратному росту интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы.

A.A. LISKOVICH

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE OF A Ni-Cr ALLOY ON THE INTENSITY OF SPECTRAL LINES OF A LASER-EMISSION PLASMA

It has been experimentally shown that the effect of laser radiation on the surface of a Ni-Cr target at a temperature of 700-1100°C leads to an increase in the ablated mass and a twofold increase in the intensity of the spectral lines of the laser-emission plasma.

Применение сдвоенных лазерных импульсов для обработки материалов и спектрального анализа приводит к значительному росту аблированной массы вещества и интенсивности спектральных линий излучения плазменного факела по сравнению с моноимпульсным воздействием [1-4]. Механизмы и причины этого до конца не установлены. В работах [1, 3-4] экспериментально показан существенный рост интенсивности линий и массы аблированного вещества при воздействии на Al- и Cu-мишени сдвоенными лазерными импульсами с плотностью мощности $\sim 10^9$ Вт/см². Этот рост объяснялся высокой температурой эрозионного кратера, образованного первым лазерным импульсом в паре. Исследование абляции мишени, находящейся при высокой температуре, показало значительное ее влияние на эффективность выноса материала и интенсивность спектральных линий плазменного факела [5].

Экспериментальное оборудование и методика исследований настоящей работы были аналогичными [5-7]. Использовался YAG:Nd³⁺-лазер, работающий как в режиме одиночных, так и в режиме сдвоенных импульсов. Энергия одиночного импульса на длине волны $\lambda=1,06$ мкм составляла 15 мДж. Объектом исследования являлся Ni-Cr сплав, состоящий из $\sim 80\%$ никеля и $\sim 20\%$ хрома. Нагрев мишени осуществлялся путем пропускания электрического тока через нее. Температура мишени измерялась с помощью оптического измерителя температуры ИТ-3СМ.

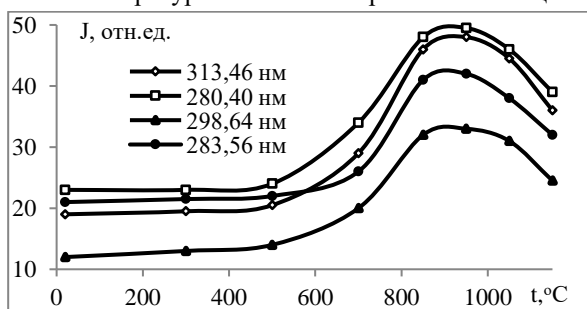


Рис. 1. Зависимости интенсивности линий лазерно-эмиссионной плазмы от температуры Ni-Cr мишени

Исследованы зависимости интенсивности более 20-ти спектральных линий излучения плазмы от температуры Ni-Cr мишени. На рис. 1 представлены зависимости интенсивности спектральных линий атомов (313,46 нм) и ионов (286,40 нм) никеля, атомов (298,64 нм) и ионов (283,56 нм) хрома от температуры мишени до $\sim 500^\circ\text{C}$ практически не оказывает влияние на интенсивность линий, как никеля, так и хрома. Ее влияние фактически начинает проявляться с $\sim 600^\circ\text{C}$. При температурах мишени 850-1000°C интенсивность линий возрастала более чем в 2 раза. При температурах больших 1000°C их интенсивность начинает уменьшаться. Рост интенсивности линий плазмы обусловлен тем, что

при воздействии лазерного излучения на «горячую» поверхность мишени на ее догрев до температуры плавления затрачивается значительно меньше энергии лазерного импульса, чем при воздействии на «холодную» мишень. Образовавшаяся «экономия» энергии лазерного импульса идет на испарение мишени и плазмообразование.

Снижение интенсивности линий плазмы при температурах больших 1000°C обусловлено с тем, что при температурах близких к температуре плавления материала мишени, наряду с паро-плазменным выносом материала из нее, происходит также капельный вынос материала. Это подтверждается наличием бруствера, образованного микрокаплями материала мишени вокруг кратера. Воздействие на «горячую» мишень сдвоенными лазерными импульсами также приводит к росту интенсивности спектральных линий. Однако описанные выше процессы происходят при температурах мишени на $\sim 200^\circ\text{C}$ меньшей, чем при моноимпульсном лазерном воздействии.

Список литературы

1. Першин С.М. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 1. С. 63–67.
2. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат.. Фіз.. Інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 2. С. 103.
3. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат.. Фіз.. Інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 3. С. 100.
4. Зноско К.Ф. // Лещик С.Д. Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. 2021. Т. 11, № 1. С. 45-58.
5. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат.. Фіз.. Інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2021. Т. 11, № 1. С. 94-106.
6. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.В. // Журн. прикладной спектроскопии. 2018. Т.85, №2. С.285-292.
7. Anufrik S.S., Kurian N.N., Zhukova I.I., Znosko K.F., Belkov M.V. // J. of Applied Spectroscopy. 2016. V.83, No 5. P. 764.

К.С. ЛУКЬЯНОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, И.Ю. ТИЩЕНКО, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНОГО ВОЛОКОННОГО ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

Разработан многоканальный волоконный гетеродинный интерферометр с квадратурной демодуляцией. Проведены испытания помехозащищенности от акустических и электромагнитных наводок, создаваемых плазменным ускорителем. Проведены исследования плазменного потока, создаваемого ускорителем при разных режимах работы.

K.S. LUKYANOV, K.L. GUBSKIY, I.YU. TISHCHENKO, A.A. YASTREBTSEV
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF MULTICHANNEL FIBER-BASED HETERODYNE INTERFEROMETER FOR PULSED PLASMA DIAGNOSTIC

A multichannel fiber-based heterodyne interferometer with quadrature demodulation has been developed. Tests of noise immunity from acoustic and electromagnetic pickups created by a plasma accelerator have been carried out. Investigations of the plasma flow created by the accelerator under different operating modes have been carried out.

В настоящее время изучение свойств плазмы, генерируемой установками типа ТОКАМАК и плазменными ускорителями, является важной задачей, стоящей на пути к созданию перспективных источников термоядерной энергии, а также мощных плазменных ракетных двигателей [1][2]. Среди методов, позволяющих оценить характеристики плазменного потока, наиболее универсальным является метод, основанный на измерении электронной плотности плазмы при помощи лазерной интерферометрии плазмы [3]. Наиболее точные значения концентрации свободных электронов в плазме могут быть получены с использованием метода гетеродинной интерферометрии отличается высокой чувствительностью и помехозащищенностью.

В работе представлен четырёхканальный волоконный гетеродинный интерферометр с квадратурной демодуляцией, разработанный для измерения электронной плотности плазмы и скорости плазменного потока. Разработанная диагностическая система позволяет измерять концентрацию свободных электронов в диапазоне от 10^{13} до 10^{23} м⁻³ и временным разрешением лучше 1 мкс. В данной конфигурации измерительной системы авторы испытывали и сравнивали разные методы демодуляции сигнала и проводили исследования помехоустойчивости разработанной системы.

Испытания, проведенные на плазменном ускорителе при разных режимах работы, показали, что на результаты измерения концентрации свободных электронов не влияют электромагнитные и акустические наводки. В дальнейшем предполагается масштабирование измерительной системы до восьми оптических каналов и проведение исследования динамики пространственного распределения импульсной плазмы на ряде научных установок.

Список литературы

1. Alexander J. Creely, Lucio M. Milanese, Elizabeth A. Tolman, et al. Design study of a combined interferometer and polarimeter for a high-field, compact tokamak. *Phys. Plasmas* 27, 042516 (2020)
2. Takahiro N., Kenji T., Hiroyuki N. Direct Measurement of Electromagnetic Thrust of Electrodeless Helicon Plasma Thruster Using Magnetic Nozzle // *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*. Vol:6, №:11, 2012
3. Кузнецов А.П. Лазерная интерферометрия в диагностике импульсной плазмы: Дис. док. ф.-м. наук: 01.04.21, 01.04.08 // Кузнецов Андрей Петрович; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». - М., 2012. - 275 с.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ В ВАЛИКАХ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

В статье исследуется влияние режимов лазерной наплавки на изменение микротвердости в валиках самофлюсующегося сплава на основе никеля. Показано, что изменения скорости и дистанции наплавки вызывают заметные изменения средней микротвердости материала валиков.

M.A. KARDAPOLOVA, N.I. LUTSKO, L.I. PILETSKAIA
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

MICROHARDNESS FORMATION BEHAVIORS IN NICKEL ALLOY TRACKS, DEPOSITED BY LASER CLADDING

The article investigates the influence of laser cladding regimes on the change in the self-fluxing nickel-based alloy tracks microhardness. It is shown that changes in the speed and distance of cladding cause noticeable changes in average microhardness of the tracks material.

Лазерная наплавка является быстроразвивающейся технологией упрочнения-восстановления поверхностей. Покрытия, полученные лазерной наплавкой, имеют небольшой размер зерна, низкую степень диффузии, меньшее количество дефектов, они характеризуются высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью [1].

В данной работе исследовалось влияние режимов лазерной наплавки на среднюю микротвердость в валиках из никелевого сплава ПГ-12Н-01. Валики наносились на образцы из стали 45 на установке, оснащенной непрерывным CO₂-лазером. Наплавка выполнялась при мощности 1000 Вт с различными скоростями и дистанциями наплавки. Микротвердость исследовали по глубине валиков с шагом 0,05 мм на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г.

Были определены средние величины микротвердости и построены графики изменения микротвердости от скорости наплавки (рис. 1) и дистанции наплавки (рис. 2). При малых скоростях наплавки и, соответственно, большом энергокладе, в валиках из сплава ПГ-12Н-01 образуется достаточно крупнозернистая структура с низкой микротвердостью. С ростом скорости наплавки и уменьшением энергоклада в валики, величина зерна уменьшается, а микротвердость растет. При скорости наплавки 100 мм/мин формируется оптимальная зернистость структуры и наблюдается максимальная микротвердость. С увеличением скорости наплавки из-за уменьшения энергоклада в покрытие в нем создаются условия неполного сплавления материала валиков по границам зерен и микротвердость уменьшается.

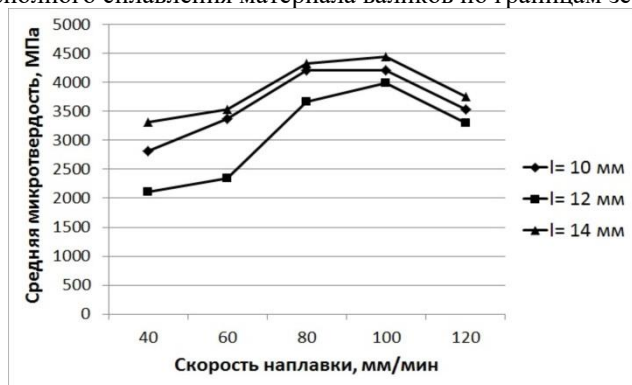


Рис. 1. Зависимость микротвердости от скорости наплавки

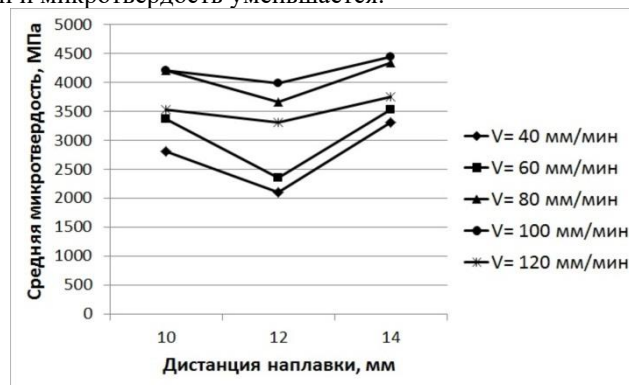


Рис. 2. Зависимость микротвердости от дистанции наплавки

С увеличением дистанции наплавки изменяются условия поглощения энергии лазерного излучения материалами подложки и покрытия. При изменении дистанции наплавки и, соответственно, положения фокуса лазерного луча, изменяются условия поглощения энергии лазерного излучения материалами покрытия и основы. При дистанции 10 мм (фокус в материале основы) покрытие расплавляется минимально, диффузия железа из основы невелика, микротвердость покрытия достаточно большая. При дистанции 12 мм (фокус на поверхности основы) покрытие и основа расплавляются максимально, микротвердость покрытия из-за большой диффузии железа уменьшается. При дистанции 14 мм (фокус в покрытии) основа переплавляется незначительно, диффузия железа уменьшается, микротвердость покрытия увеличивается.

Список литературы

1. Naghiyan Fesharki, M. Microstructure investigation of Inconel 625 coating, obtained by laser cladding and TIG cladding methods [Электронный ресурс]/ M. Naghiyan Fesharki, R. Shoja-Razavi, H.A. Mansouri, H. Jamali// Surface & Coating Technology. – 2018. – V. 353. – P. 25-31. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.061>.

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ ИЗ САМОСВЯЗАННОГО SiC С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведены исследования возможности спекания слоев из самосвязанного карбида кремния методом их лазерного разогрева без использования традиционных для этого процесса высокотемпературных печей и без какой-либо дополнительной пропитки материалами, содержащими углерод после силицирования. Лазерное излучение позволяет осуществлять нагрев в каждой точке воздействия и при этом легко менять температуру, что является необходимым условием синтеза самосвязанного карбида кремния, у которого типовая процедура получения состоит из организации нескольких стадий при различных тепловых режимах. Качество полученных образцов оценивалось различными физическими методами после вытравливания в них остатков свободного кремния в смеси концентрированных кислот. Особое внимание уделялось исследованию типов образовавшегося вторичного карбида кремния и изучению границ между полученными слоями. Слои образовывались двумя способами: последовательным наращиванием и спеканием прослойки между двумя ранее изготовленными образцами, что может являться имитацией процесса их сварки.

S.A. LYSENKO, N.N. YURYSHEV, N.P. VAGIN
P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

FORMATION OF LAYERS FROM SELF-BONDED SiC USING LASER RADIATION

The possibility of sintering layers of self-bonded silicon carbide by laser heating without the use of traditional high-temperature furnaces for this process and without any additional impregnation with materials containing carbon after siliconizing has been studied. Laser radiation makes it possible to heat at each point of action and at the same time easily change the temperature, which is a necessary condition for the synthesis of self-bonded silicon carbide, in which a typical production procedure consists of organizing several stages under various thermal conditions. The quality of the obtained samples was assessed by various physical methods after etching out free silicon residues in them in a mixture of concentrated acids. Particular attention was paid to the study of the types of secondary silicon carbide formed and the study of the boundaries between the resulting layers. The layers were formed in two ways: successive growth and sintering of the interlayer between two previously made samples, which can be an imitation of the process of their welding.

Получение самосвязанного карбида кремния (SiSiC) является недорогим и технически достаточно простым способом получения близкого по свойствам к кристаллическому или поликристаллическому карбиду кремния. Основная проблема при работе с данным материалом, особенно при наращивании слоев, является отсутствие у него процесса плавления. Для преодоления этого необходимо организовать химическую реакцию синтеза углерода и кремния, в результате которой будет образовываться вторичный кремний [1], являющий связкой не только для первичных частиц карбида кремния изначально присутствующих в шихте, но для связи между ними в слоях.

В результате проведенных экспериментов и исследований обнаружены политипы SiC, которые ранее в шихте не присутствовали, что подтверждает образование вторичного карбида кремния из-за лазерного нагрева.

При изучении границ между слоями были найдены участки, где граница между слоями стирается. Это позволяет надеяться на возможность создания условий для изготовления образцов методом наращивания или стыкования слоев, т.е. организации работ по ликвидации трещин и герметизации отверстий.

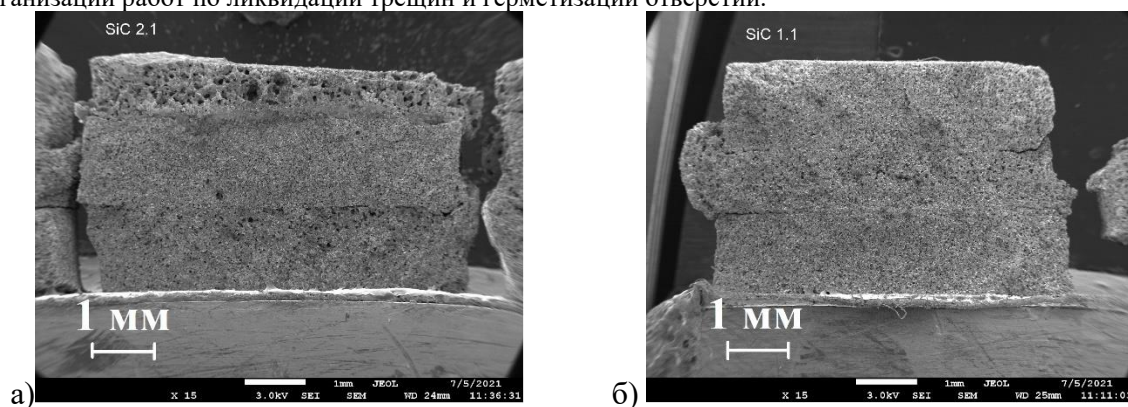


Рис. 1. а) вид излома образца из 3-х слоев с последовательным спеканием слоев
б) Вид излома образца из 3-х слоев со спеканием среднего слоя между двумя ранее спеченными

Список литературы

1. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. М.: Металлургия, 1977. 216 с.

Д.В. МАРИН^{1,2}, А.С. ЩЕКИН^{1,2}, А.А. КОЛЧИНА^{1,2}, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В МЕТАЛЛАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Была построена компьютерная модель импульсного нагрева стали и монокристаллического кремния, и проведена её экспериментальная проверка.

D.V. MARIN¹, A.S. SHCHEKIN^{1,2}, A.A. KOLCHINA^{1,2}, V.N. PETROVSKIY¹

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

²IPG IRE-Polus, Fryazino, Russia

COMPUTER SIMULATION OF THERMAL FIELDS IN A CONDUCTORS AND SEMICONDUCTORS UNDER THE INFLUENCE OF NANOSECOND LASER PULSES

A computer model of pulsed heating of steel and single-crystal silicon was built, and its experimental verification was carried out.

Механизмы поглощения металлов и полупроводников отличаются [1], что приводит к возникновению отличий при лазерной обработке металлов и полупроводников.

Моделирование процесса теплового нагрева от лазерного излучения отлично для различных длительностей импульса. Это связано с временем релаксации энергии, полученной от лазерного излучения, на кристаллической решетке, приводящей к росту температуры решетки. Различают два принципиально различных режима обработки.

Режим «коротких» импульсов (пико- и фемтосекунды) не рассматривается в данной работе, поскольку обработка наносекундными импульсами обладает рядом преимуществ в сравнении с обработкой ультракороткими импульсами: высокая производительность [2] и дешевизна.

В режиме «длинных» импульсов, когда длительность импульса много больше времени релаксации, происходит выравнивание температур электронного газа и решетки, поэтому лазерное излучение можно считать источником тепла, а соответствующая задача о нагреве может быть рассмотрена с точки зрения законов теплопроводности.

В настоящей работе, используя COMSOL Multiphysics, была построена компьютерная модель импульсного нагрева стали и монокристаллического кремния и проведена экспериментальная проверка (Рис. 1). На основании чего были сделаны выводы о том, как необходимо корректировать модель и какие упрощения допустимы, а какие критичны.

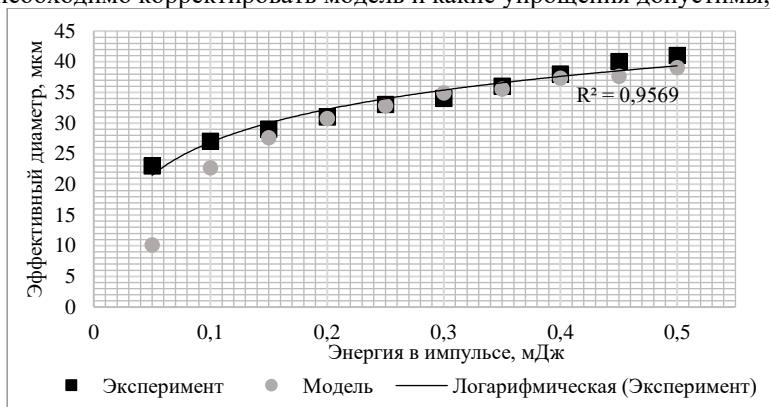


Рис. 1. График зависимости диаметра зоны абляции от энергии в импульсе

Список литературы

1. Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н. Физические основы лазерной технологии.
2. Wang X. et al. Numerical simulation and experimental study on picosecond laser ablation of stainless steel // Optics and Laser Technology. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 127, № August 2019. P. 106150.

И.А. НОВИКОВ, И.Ю. ТИЩЕНКО, К.Л. ГУБСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрен метод регистрации спектра рассеянного лазерного излучения, сформированного трехрешетчатым спектроскопом, с помощью системы кремниевых фотоумножителей. Для изучения свойств плазмы используется метод томсоновского рассеяния, с помощью которого, за счет рассеяния лазерного излучения на электронах плазмы, можно определить температуру и скорость потока плазмы. Проведена оценка оптимальной ширины регистрируемой области спектра для анализа скорости и температуры потока плазмы.

I.A. NOVIKOV, I.Y. TISHENKO, K.L. GUBSKIY

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

OPTIMIZATION OF THE THOMSON SCATTERING SPECTRUM REGISTRATION SYSTEM

A spectrum registration method of scattered laser radiation formed by a triple grating spectrograph using a silicon photomultiplier system is considered. Thomson scattering method is applied for studying plasma properties, with help of which, due to the scattering of laser radiation on plasma electrons, the determination of temperature and velocity of the plasma flow is possible. The optimal registration region width of the spectrum for the analysis of the velocity and temperature of the plasma flow is assessed.

Томсоновское рассеяние является одним из методов, используемых для диагностики свойств плазмы. Фотоны, испущенные лазером, испытывают частотный сдвиг и уширение спектра при взаимодействии со свободными электронами, присутствующими в плазме [1]. Затем с помощью трехрешетчатого спектроскопа происходит сбор, фильтрация и анализ рассеянного излучения.

В настоящей работе произведен поиск оптимальной ширины области спектра рассеянного излучения, сформированного трехрешетчатым спектроскопом и зарегистрированного системой кремниевых фотоумножителей. В среде MATLAB смоделирована регистрация рассеянного излучения фотодиодами в различных спектральных диапазонах. Излучение имело различные значения числа падающих фотонов, частотного сдвига, которым соответствуют скорости движения потока электронов в плазме 10, 40, 70, 100 км/с, и уширения спектра излучения, которым соответствуют температуры 1, 2, 4 эВ. По зарегистрированным значениям числа фотонов методом наименьших квадратов производилось восстановление профиля распределения падающего излучения, определялись значения математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений (далее СКО) частотного сдвига и уширения спектра. Установлена зависимость значения СКО частотного сдвига и уширения спектра от характеристик падающего излучения. Методом наименьших квадратов найдена функция, связывающая значения СКО с характеристиками падающего излучения, как для частотного сдвига, так и для уширения спектра.

Список литературы

1. Marcus Johannes van de Sande M J 2002 Laser scattering on low temperature plasmas — high resolution and stray light rejection Technische Universiteit Eindhoven, 2002.

ДИНАМИКА ОТРАЖЕНИЯ СУБПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ В ЖИДКОСТЯХ

Рассмотрены оптические свойства плазмы, возбуждаемой субпикосекундным инфракрасным лазерным импульсом в жидкостях. Численное моделирование, построенное на уравнениях для однонаправленного распространения излучения в веществе, позволило интерпретировать отличия в коэффициентах отражения плазмы в воде и этаноле. Измерения отражения оптической накачки с разрешением во времени обнаружили новую методику косвенной оценки динамики электронной плотности.

E.A. PONOMAREVA^{1,2}, A.O. ISMAGILOV¹, A.N. TSYPKIN¹

¹ITMO University, Saint Petersburg, Russia

²Aalto University, Espoo, Finland

DYNAMICS OF SUBPICOSECOND LASER RADIATION REFLECTION FROM LASER-INDUCED PLASMA IN LIQUIDS

The optical properties of a plasma induced under the action of strong subpicosecond infrared laser pulse in liquids are considered. Numerical simulation based on equations for unidirectional propagation of radiation allows interpreting the differences in the plasma reflectivity in water and ethanol. Time-resolved measurements of optical pump reflection have revealed a new technique for indirect estimation of electron density dynamics.

Лазерно-индуцированная плазма является важным объектом исследований в современной фундаментальной и прикладной физике. В настоящее время, наиболее яркими применениями лазерной плазмы являются устройства сверхинтенсивной оптики, ускорители частиц и источники терагерцового и рентгеновского излучения [1–3]. Для разработки всех возможных приложений необходимо исследование динамики плазмы в газообразных и конденсированных средах при различных условиях лазерного возбуждения вещества.

В настоящей работе методами одноимпульсного и двухимпульсного возбуждения, а также с помощью численного моделирования анализируются оптические свойства плазмы в различных жидкостях. В ходе экспериментальной работы с использованием лазерной системы на титан-сапфире были определены зависимости коэффициентов отражения, поглощения и пропускания воды при оптическом пробое от различных параметров излучения накачки. Измерения с разрешением во времени были проведены за счет двухимпульсной схемы с внедрением интерферометра Майкельсона. Особенностью данного цикла измерений стал анализ динамики наведенного отражения третьей гармоники импульса накачки, генерируемой в воздухе перед струей воды. Полученные результаты выявили ряд интересных особенностей, одной из которых стал временной сдвиг максимума по отраженной энергии для ряда используемых жидкостей. Так, например, на рис. 1 приведена временная динамика наведенного отражения плазмы в воде, изопропанол и этаноле при использовании импульса накачки с энергией 0,3 мкДж и длительностью 300 фс.

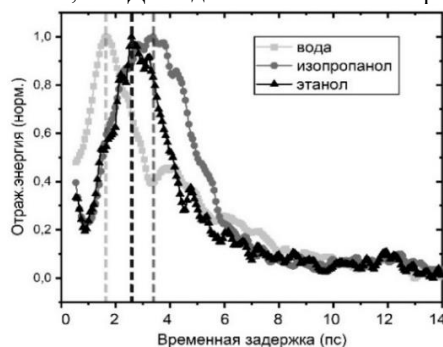


Рис. 1. Экспериментальные зависимости энергии отраженного излучения третьей гармоники импульса накачки от плазмы, возбужденной в воде (квадраты), изопропанол (круги) и этаноле (треугольники) от временной задержки между импульсами.

Показано, что данный сдвиг можно проанализировать через динамику действительной и мнимой частей диэлектрической функции ионизованных жидких сред. Из этого анализа следует значительное влияние столкновительных процессов при малых задержках между импульсами. Полученные результаты найдут применение как в разработке плазменных источников излучения, так и в фундаментальной науке взаимодействия излучения с веществом.

Список литературы

1. Thaury C., Quéré F., Geindre JP. et al. // Nature Phys. 2007. V. 3. P. 424–429.
2. Esarey E., Schroeder C. B., Leemans W. P. // Rev. Mod. Phys. 2009. V. 81. № 3. P. 1229-1285.
3. Ponomareva E.A., Ismagilov A.O., Putilin S.E. et al. // Commun Phys. 2021. V. 4. № 4.

В.А. ГОРШКОВ, А.В. СМІРНОВА
ООО "Электростекло", Москва, Россия

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ОПТИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ И СИСТЕМАМИ ЛАЗЕРОВ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

Высокоэнергетические лазерные системы предполагают использование асферических оптических компонентов, в том числе внеосевых. Габаритные размеры подобных компонентов составляют от 200 до 600 мм. Основными техническими параметрами таких компонентов являются:

- Отклонения формы волнового фронта от расчетного (как правило — это дифракционное качество);
- Частотные отклонения формируемого асферическими компонентами волнового фронта в I-II-III диапазонах [1] на различных субапертурах, задаваемые технической документацией;
- Диаметр кружка рассеяния и концентрации энергии в нем.

Для контроля указанных параметров в настоящее время применяются интерференционные стенды на базе внеосевых коллиматоров. Приводится описание интерференционного стенда, его состав и принцип работы. Даны технические параметры различных стендов для контроля, указанных выше компонентов и оптических систем.

V.A. GORSHKOV, A.V. SMIRNOVA
Electrosteklo, Moscow, Russia

INTERFERENCE QUALITY CONTROL OF WAVEFRONTS FORMED BY OPTICAL COMPONENTS AND SYSTEMS OF HIGH-POWER LASERS

High-energy laser systems involve using aspherical optical components, including off-axis ones. The overall dimensions of such components range from 200 to 600 mm. The key technical characteristics of such components are the following:

- Deviations of the shape of the wave front from the calculated one (as a rule, this is the diffraction quality);
- Frequency deviations of the wave front which is formed by aspherical components in the I-II-III ranges [1] at various sub-apertures, specified by the technical documentation;
- The diameter of the circle of diffusion and its energy concentration.

Interference test stands based on off-axis collimators are currently used to control these parameters. To control these parameters, interference stands based on off-axis collimators are currently used. The article contains a description of the interference test stands, its composition and operating principle. The article gives the technical characteristics of various test benches to control the components and optical systems mentioned above.

Список литературы

1. J. H. Campbell, R. Hawley-Fedder, C. J. Stolz, J. A. Menapace, M. R. Borden, P. Whitman, J. Yu, M. Runkel, M. Riley, M. Feit, and R. Hackel // SPIE 2004 Photonics West, San Jose, California, January 24-29, 2004. P. 7.

А.Г. ПУТИЛОВ^{1,2}, А.А. АНТИПОВ^{1,2}, А.Е. ШЕПЕЛЕВ¹, К.М. СТАНКЕВИЧ², И.И. ПРИВОДНОВ²

¹ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура, Россия

²Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПЕРЕСТРОЙКИ СПЕКТРА ГЕНЕРАЦИИ ВИБРОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ХРОМА

Использование легированных хромом вибронных кристаллов в качестве активной среды позволяет создавать мощные перестраиваемые лазеры видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Спектральная ширина усиления кристаллов александрита, гексаалюмината бериллия и LISAF позволяет использовать их в перестраиваемых лазерах, работающих в режиме свободной генерации или в режиме модуляции добротности. Одним из способов перестройки и сужения спектра излучения является использование различных типов дисперсионных элементов в резонаторе лазера.

A.G. PUTILOV^{1,2}, A.A. ANTIPOV^{1,2}, A.E. SHEPELEV¹, K.M. STANKEVICH², I.I. PRIVODNOV²

¹ILIT RAS – Branch of FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Shatura, Russia

²Vladimir state university, Vladimir, Russia

APPLICATION OF SELECTIVE RESONATORS FOR TUNING LASING SPECTRUM OF CHROMIUM DOPED VIBRONIC CRYSTALS

The use of chromium-doped vibronic crystals as active medium of lasers makes it possible to create powerful tunable lasers in the near-infrared range. The spectral width of the gain of alexandrite, beryllium hexaaluminate, and LISAF crystals makes it possible to use them in tunable near-IR lasers operating in the free-running or Q-switched mode. One of the ways to tune and narrow the lasing spectrum is to use different types of dispersive resonators.

Перестраиваемые твердотельные лазеры широко используются в области дистанционного зондирования атмосферы, лазерной спектроскопии, гиперполяризации ядерных спинов [1]. Активные среды, легированные ионами Cr³⁺ с широкой полосой усиления, такие как LISAF, александрит, гексаалюминат бериллия (ГАБ), используются для создания мощных перестраиваемых лазеров видимого и ближнего ИК-диапазонов [2].

Александрит Cr:BeAl₂O₄ и ГАБ Cr:BeAl₆O₁₀ представляют собой орторомбические кристаллы с широкими вибронными полосами излучения в области 715–790 нм для александрита и 795–890 нм для ГАБ (рис. 1).

Одним из способов перестройки лазерного излучения является использование селективных резонаторов. Введение дисперсионных элементов приводит к частотно-селективным потерям в резонаторе, т.е. условия генерации мод другие. Таким образом, происходит эффективное ограничение спектральной полосы генерируемого излучения. Сужение спектра излучения происходит из-за ухудшения добротности резонатора. В качестве дисперсионного элемента селективного резонатора использовался интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ).

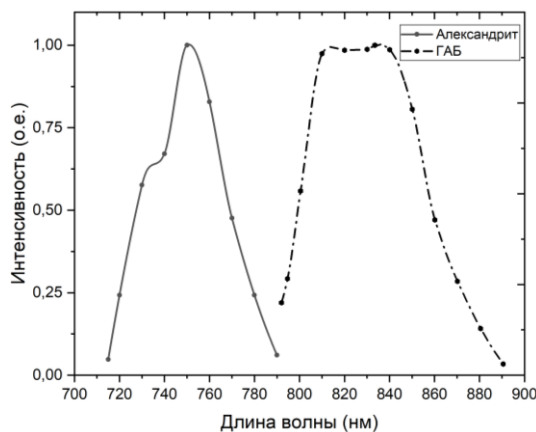


Рис. 1. Спектр перестройки лазера на александрите и ГАБ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90052, частично в рамках проекта РФФИ № 19-29-10022.

Список литературы

1. А. А. Антипов, А. Г. Путилов и др. Твердотельный лазер ближнего ИК диапазона для спин-обменной оптической накачки. Известия РАН. Серия Физическая, 2020, том 84, № 11, с. 1593–1596
2. Е. В. Пестряков, А. И. Алимпиев, В. Н. Матросов. Перспективы развития фемтосекундных лазерных систем на кристаллах бериллиевых алюминатов, активированных ионами хрома и титана. Квантовая электроника, 2001, том 31, № 8, с. 689–696

В.С. КУРБАНИСМАЙЛОВ¹, С.А. МАЙОРОВ², Г.Б. РАГИМХАНОВ¹, З.Р. ХАЛИКОВА¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Институт общей физики им. Прохорова Российской академии наук, Россия

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯД В ГЕЛИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В работе представлены результаты исследования импульсного разряда в гелии атмосферного давления в сантиметровом межэлектродном промежутке. С применением фотоэлектронного регистратора (ФЭР2-1) изучена динамика формирования свечения прикатодной плазмы, а также исследованы спектры оптического излучения разряда. Установлено, что импульсный разряд в гелии сопровождается распылением материала вещества электродов. На основе 0-мерной физико-математической модели изучена динамика расширения плазмы катодного факела. Методом Монте Карло выполнено моделирование диффузионно-дрейфовых характеристик электронов и ионов в гелии с малыми примесями паров металла (Fe).

V.S. KURBANISMAILOV¹, S.A. MAIOROV², G.B. RAGIMKHANOV¹, Z.R. KHALIKOVA¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia

DYNAMICS OF PROCESSES OF NEAR-ELECTRODE PLASMA FORMATION IN A PULSED DISCHARGE IN ATMOSPHERIC PRESSURE HELIUM

The paper presents the results of a study of a pulsed discharge in helium at atmospheric pressure in a centimeter interelectrode gap. With the use of a photoelectronic recorder (FER2-1), the dynamics of the formation of the glow of the near-cathode plasma was studied, and the spectra of the optical radiation of the discharge were studied. It has been established that a pulsed discharge in helium is accompanied by atomization of the material of the electrode substance. On the basis of a 0-dimensional physical and mathematical model, the dynamics of the expansion of the plasma of the cathode torch is studied. The Monte Carlo method was used to simulate the diffusion-drift characteristics of electrons and ions in helium with small metal (Fe) vapor impurities.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований формирования и развития приэлектродной плазмы в импульсном разряде в гелии атмосферного давления в сантиметровом межэлектродном промежутке [1].

Система щелей в сочетании со скоростным ФЭУ, а также динамические картины свечения промежутка, полученные с помощью ЭОП, позволили регистрировать временной ход свечения приэлектродных областей и определить скорость расширения катодного пятна. Были получены результаты, относящиеся к стадии разлета плазмы, скорость которого равна на начальном этапе 210^6 см/с. Разработана физико-математическая модель расширения катодного факела и рассчитаны пространственно-временные распределения концентрации ионов и атомов металла, электронов, давления и плотности газа, а также скорости расширения прикатодной плазмы.

Следует отметить, что в спектре разряда наряду с линиями исследуемого газа (He) возбуждаются линии материала электродов (Fe) (см. рис.)

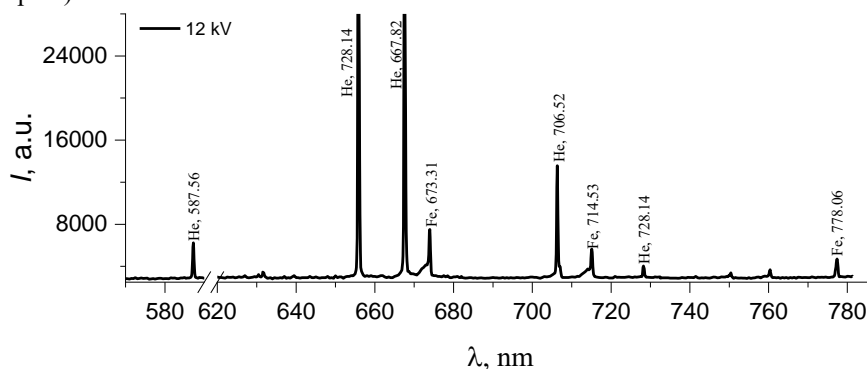


Рис. 1. Панорамный спектр излучения прикатодной плазмы в гелии: $U_0=12$ кВ, $p=760$ Торр

С увеличением энерговклада в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые спектральные линии исследуемого газа (He) и материала вещества электродов (Fe).

Методом Монте-Карло выполнено моделирование диффузионно-дрейфовых характеристик электронов и ионов в смеси гелия с малыми примесями металла. Показано, что малые примеси металла существенно влияют на характеристики дрейфа электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-01069а).

Список литературы

1. Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б. // ЖТФ. 2019. Вып. 3. С. 384- 386.

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ,
А.А. КОТКОВ, А.М. САГИТОВА, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, Д.В. СИНИЦЫН, О.А. РУЛЕВ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ СО- И СО₂-ЛАЗЕРОВ И НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ (~1.7–19.3 МКМ)

Приведён обзор работ по созданию в ФИАН гибридной ИК лазерной системы, действующей в диапазоне от ~1.7 до ~19.3 мкм за счёт преобразования в различных нелинейных кристаллах излучения щелевых СО- и СО₂-лазеров с ВЧ-накачкой.

A.A. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY, YU.M. KLIMACHEV, A.YU. KOZLOV,
A.A. KOTKOV, A.M. SAGITOVA, L.V. SELEZNEV, D.V. SINITSYN, O.A. RULEV
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

HYBRID LASER SYSTEM BASED ON CO AND CO₂ LASERS AND NONLINEAR CRYSTALS (~1.7–19.3 μm)

The review is presented on the development at the Lebedev Physical Institute of a hybrid IR laser system operating in the spectral range from ~1.7 to ~19.3 μm due to the conversion of RF-pumped slab CO and CO₂ laser emission in various nonlinear crystals.

В ФИАН создана гибридная лазерная система на базе СО- и СО₂-лазеров и нелинейных кристаллов, действующая в спектральном диапазоне ~1.7–19.3 мкм. Первые работы по преобразованию излучения этих лазеров в нелинейных кристаллах, выполненные в Лаборатории газовых лазеров ФИАН, рассмотрены в более ранних обзорных публикациях [1–3]. Позднее нами была создана лазерная система, одновременно работающая в двух спектральных диапазонах: основной полосе СО-лазера (4.9–6.0 мкм) и полосе генерации суммарных частот (ГСЧ) (2.5–3.0 мкм). Использовался импульсно-периодический многочастотный СО-лазер с ВЧ-накачкой, работающий в режиме модуляции добротности резонатора (МДР). ГСЧ осуществлялась внутри резонатора в новом нелинейном кристалле ВаGa₂GeSe₆ (BGGSe) [4]. Рассматривались различные конфигурации резонатора, в частности, нелинейный кристалл использовался в качестве выходного зеркала, а в других конфигурациях применялись выходные зеркала с различными параметрами. Пиковая мощность основных и суммарных частот достигала 2 кВт и 10 Вт соответственно.

В дальнейшем нам удалось ещё больше расширить спектр лазерной системы в коротковолновую область за счёт генерации третьей гармоники (ГТГ), т.е. ГСЧ излучения основной полосы СО-лазера и суммарных частот, полученных в кристалле BGGSe внутри резонатора. Предварительно была проведена оптимизация лазера (изменен состав активной среды, круглая диафрагма заменена на щелевую). Для ГТГ 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, что соответствует эффективности преобразования 10⁻²% [5].

Также была получена внутррезонаторная ГСЧ в кристалле ZnGeP₂ [6] с перестройкой спектра за счет изменения температуры кристалла. Отношение мощностей ГСЧ и частотах СО-лазера составило ~16%. Оно оказалось выше по сравнению с результатами, полученными с кристаллом BGGSe (11.5%) на той же лазерной установке [4].

Излучение в длинноволновой области (~12–19.3 мкм) получено путём генерации разностных частот излучения импульсно-периодических щелевых ВЧ СО- и СО₂-лазеров с совместной МДР в нелинейных кристаллах AgGaSe₂, BGGSe или PbIn₆Te₁₀ (PIT). СО₂-лазер излучал на четырех спектральных линиях в диапазоне длин волн от 9.2 до 9.6 мкм. Пиковая мощность излучения при этом была 0.3 кВт, а максимальная мощность излучения на отдельно взятой спектральной линии – 250 Вт. Спектр СО-лазера насчитывал 30 линий в диапазоне длин волн 5.4–6.4 мкм. Пиковая мощность излучения достигала 0.5 кВт, максимальная мощность излучения на отдельно взятой линии – 67 Вт. Для указанных выше кристаллов была исследована эффективность преобразования частоты излучения в область ~12–19.3 мкм среднего ИК-диапазона, максимальное значение мощности преобразованного излучения было получено для кристалла PIT и достигало 37 мВт (эффективность преобразования 10⁻⁴) [7].

Таким образом, была создана широкополосная лазерная система на базе щелевых СО/СО₂-лазеров с высокочастотной накачкой и модуляцией добротности резонатора в сочетании с нелинейными кристаллами. Данная широкополосная лазерная система за счет преобразования частоты различными кристаллами действовала в спектральном диапазоне от ~1.7 до ~19.3 мкм. Работы, выполненные в 2016–20 гг., были поддержаны грантом РФФ № 16-19-10619.

Список литературы

1. Андреев Ю.М. и др. // Квантовая электроника. 2013. Vol. 43, № 2. P. 139–143.
2. Ионин А.А. и др. // Оптика и спектроскопия. 2015. Vol. 119, № 3. P. 381–387.
3. Ионин А.А. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2016. Vol. 7, № 5. P. 383–390.
4. Ionin A.A. et al. // Opt. Lett. 2018. Vol. 43, № 18. P. 4358–4361.
5. Ionin A.A. et al. // Optics & Laser Technology. 2019. Vol. 115. P. 205–209.
6. Ionin A.A. et al. // Optics & Laser Technology. 2022. Vol. 148. P. 107777.
7. Ionin A.A. et al. // Opt. Express. 2019. Vol. 27, № 17. P. 24353–24361.

С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹, П.М. САЙПУЛАЕВ¹, Р.М. ЭМИРОВ¹, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ^{1,2},
А.Э. РАБАДАНОВА

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия
² Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА РАЗМЕР КРИСТАЛЛИТОВ В НАНОПОРОШКЕ BaZrO₃

Синтезированы нанопорошки состава BaZrO₃ золь-гель методом и исследована их структура. Установлено в порошках максимальное (до ~ 90%) содержание фазы BaZrO₃ и соответственно минимальная доля вторичной фазы BaC₂. Осуществлена термообработка порошков при различных режимах. Исследовано влияние термообработки на средний размер кристаллитов. Установлено, снижение средних размеров кристаллитов при увеличении температуры обработки.

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV¹, P.M. SAIPULAEV¹, R.M. EMIROV¹, N.M.-R. ALIKHANOV^{1,2},
A.E. RABADANOVA¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia
²Institute of Physics of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON CRYSTALLITE SIZE IN BaZrO₃ NANOPOWDER

The BaZrO₃ nanopowders were synthesized by the sol-gel method and their structure was studied. The maximum (up to ~ 90%) content of the BaZrO₃ phase and, accordingly, the minimum fraction of the secondary BaC₂ phase were established in the powders. Heat treatment of powders was carried out under various modes. The influence of heat treatment on the average size of crystallites has been studied. It has been established that the average size of crystallites decreases with increasing processing temperature.

Материалы на основе BaZrO₃, обладающие высокой термической стабильностью и низкой теплопроводностью, до сих пор в центре внимания исследователей [1,2], и благодаря чему перспективны для использования термобарьерных покрытий в газовых турбинах и дизельных двигателях, в качестве высокотемпературных катализаторов и т.д. Для изготовления материалов на основе BaZrO₃ в наноструктурированном виде эффективно применяется золь-гель метод, включающий процесс смешивания прекурсоров на молекулярном уровне, позволяющий получать их с высокой однородностью по составу и контролируя стехиометрию. В настоящей работе синтезированы нанопорошки состава BaZrO₃, используя разновидность золь-гель метода. Полученный исходный порошок состоял из агломерированных наночастиц в виде «хлопьев» (см. рис.1).

Для формирования заданной дисперсности частиц необходима термическая обработка. Такую обработку осуществляли при режимах (номер режима указан в скобках): при температурах 500°C(№1), 600°C(№2), 700°C(№3), 800°C(№4) и 900°C(№5) с выдержкой при них в течение 30 мин; для одного и того же порошка поэтапно в течение 30 мин в четыре режима (№6 -№9) – в один этап при 600°C (№6), в два этапа при 600°C и 700°C (№7), в три этапа при 600°C, 700°C и 800°C (№8), в четыре этапа при 600°C, 700°C, 800°C и 900°C (№9). Скорости подъема и охлаждения до этих температур составляли ~5°C/мин и ~3°C/мин.

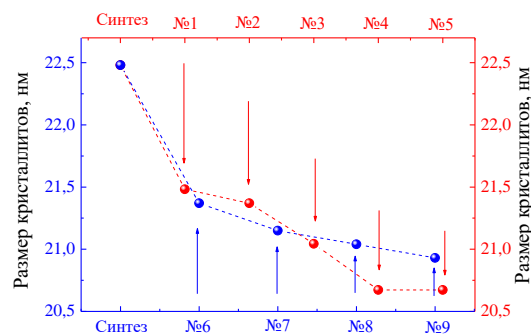
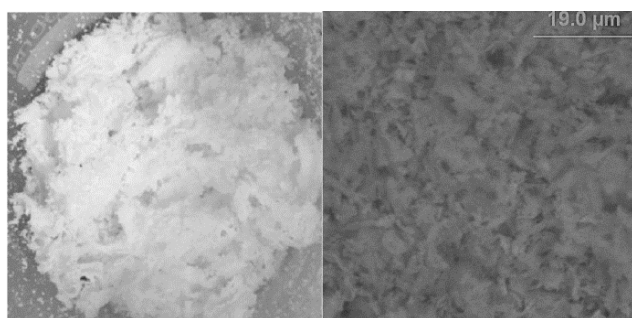


Рис. 1. Морфология исходного порошка и средний размер кристаллитов (до – исходного (синтезированного) и после термообработки при различных режимах обработки)

Согласно результатам структурного анализа, порошки преимущественно (около ~90%) обладают фазой BaZrO₃ с пространственной группой *Pm-3m* и побочной фазой карбида бария (фаза BaC₂). Средний размер кристаллитов, рассчитывался по полуширине пиков, используя известную формулу Шеррера. Как видно, наблюдается снижение средних размеров кристаллитов при увеличении температуры обработки (рис.1).

Работа выполнена в рамках проекта УМНИК (Договор 16504ГУ/2021 от 31.05.2021) и частично Гос. задания FZNF-2020-0002.

Список литературы

1. Tsvetkov D. S. et al. // *Chimica Techno Acta.* – 2020. – Vol. 7. – № 2. – С. 42-50.
2. Алиханов Н.М. и др. // Патент № 2641203 от 16.01.2018.

К.К. САМАРХАНОВ¹, Э.Г. БАТЫРБЕКОВ², М.У. ХАСЕНОВ^{1,3}, Ю.Н. ГОРДИЕНКО¹,
Ю.В. ПОНКРАТОВ¹, Е.Ю. ТУЛУБАЕВ¹, В.С. БОЧКОВ¹, А.Н. СЛУЯНОВ¹, С.В. ТОЛМАЧЕВ¹

¹Филиал Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

²Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

³Школа естественных, социальных и гуманитарных наук, Назарбаев Университет, Нур-Султан, Казахстан

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВЫХ СРЕД ПРИ НАКАЧКЕ ПРОДУКТАМИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Представлено описание экспериментальной (методической и аппаратурной) базы Национального ядерного центра РК (г. Курчатов) для проведения внутриреакторных экспериментов на импульсном ядерном реакторе по исследованию пороговых характеристик когерентного оптического излучения при возбуждении газовых смесей продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$. Описана процедура изготовления внутриреакторного устройства с литиевым источником возбуждения газовых сред, а также методика проведения внутриреакторных экспериментов на импульсном ядерном реакторе.

K.K. SAMARKHANOV¹, E.G. BATYRBEKOV², M.U. KHASENOV^{1,3}, YU.N. GORDIENKO¹, YU.V.
PONKRATOV¹, YE.YU. TULUBAYEV¹, A.N. SLUYANOV¹, S.V. TOLMACHEV¹

¹Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

²National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

³School of Sciences and Humanities, Nazarbayev University, Nur-Sultan, Kazakhstan

EXPERIMENTAL FACILITY AND TECHNIQUE FOR THE STUDY OF THE EMITTING PROPERTIES OF GAS MEDIA DURING PUMPING BY PRODUCTS OF ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ NUCLEAR REACTION IN THE NUCLEAR REACTOR CORE

The description of the experimental (methodical and instrumentation) base of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (Kurchatov city) for in-pile experiments on a pulsed nuclear reactor to study the threshold characteristics of coherent optical radiation during excitation of gas media by products of the ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ nuclear reaction is presented. The procedure for manufacturing an irradiation device with a lithium source of excitation of gas media as well as the methodology of in-pile experiments on a pulsed nuclear reactor are described.

Исследование оптического излучения (лазерного и спонтанного) ядерно-возбуждаемой плазмы, образованной продуктами ядерных реакций, представляет интерес для разработки способа вывода энергии из ядерного реактора путем прямого преобразования ее в световую энергию [1, 2]. Непосредственная накачка активных сред осуществляется, как правило, продуктами ядерных реакций с тепловыми нейтронами ядерного реактора: ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$, ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$, ${}^{235}\text{U}(n,f)\text{F}$ или другими. Рабочая среда лазера должна содержать ${}^{235}\text{U}$, ${}^3\text{He}$ или ${}^{10}\text{B}$, либо соединение с этими изотопами наносится на стенки лазерной камеры. Менее исследовано применение ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан обладает тремя исследовательскими реакторами: ИВГ.1М [3], ИГР [4] и РА [5]. На исследовательском ядерном реакторе ИВГ.1М проведена серия реакторных экспериментов с инертными газами и их различными смесями в широком температурном диапазоне, в процессе которых были получены новые данные по спектрально-люминесцентным характеристикам ядерно-возбуждаемой плазмы. Результаты реакторных экспериментов показали [6, 7], что при температурах выше 550 К происходит интенсивное излучения лития, выделяющегося при вылете продуктов ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ из литиевого слоя.

Создание методической и аппаратурной базы для проведения экспериментов на импульсном реакторе ИГР является первоочередным этапом для реализации практической деятельности в области прямого преобразования ядерной энергии в энергию когерентного оптического излучения. На основе опыта проведения реакторных экспериментов на реакторе ИВГ.1М и учитывая специфику проведения экспериментов на реакторе ИГР была разработана принципиальная схема экспериментальной установки. Экспериментальная установка включает в себя три основные системы: газо-вакуумная, информационно-измерительная, внутриреакторное облучательное устройство.

Работа выполняется при поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан (Программа «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан на 2021–2023 годы»).

Список литературы

1. Mel'nikov S.P., Sizov A.N., Sinyanskii A.A., Miley G. H. // "Lasers with Nuclear Pumping", Springer, 2015. pp. 455.
2. Baturbekov E. // Laser Part. Beams. 2013. V. 31, pp. 673-687.
3. Irkimbekov R., Zhagiparova L., Kotov V., Vurim A., Gnyrya V. // Atomic Energy. 2019. V. 127. pp. 69–76.
4. Kotov V.M., Kurpeshova A.M., Irkimbekov R.A. // Atomic Energy. 2011. V. 111. pp. 158–162.
5. А.Д. Вурим, А.Н. Колбаенков, В.С. Гныря, А.С. Азимханов, И.К. Дербышев, Ю.А. Попов. // Человек. Энергия. Атом. 2019.
6. Baturbekov E., Khasenov M., Gordienko Yu., Samarkhanov K., Ponkratov Yu. // J. Lumin. 2020. V. 220. 116973
7. Samarkhanov K, Khasenov M, Baturbekov E, Kenzhina I, Sapatayev Ye, Bochkov V. // Sci. Technol. Nucl. Install. 2020.

Н.С. СЕМИН^{1,2}, И.О. КИНЯЕВСКИЙ¹, П.А. ДАНИЛОВ¹, С.И. КУДРЯШОВ¹, А.В. КОРИБУТ¹,
Е.Е. ДУНАЕВА³, И.С. ВОРОНИНА³, А.А. ИОНИН¹

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ДВУХ-ФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ ЛЕГИРОВАННОМ СТРОНЦИЕМ

Исследовано явления двух-фотонного поглощения лазерного излучения с длиной волны 515 нм в кристаллах $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ и $\text{Ca}_{2.7}\text{Sr}_{0.3}(\text{VO}_4)_2$. Определен коэффициент двух-фотонного поглощения для этих кристаллов. Показано, что легирование кристалла $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ атомами Sr увеличивает ширину запрещенной зоны и уменьшает двух-фотонное поглощение.

N.S. SEMIN^{1,2}, I.O. KINYAEVSKIY¹, P.A. DANILOV¹, S.I. KUDRYASHOV¹, A.V. KORIBUT¹,
E.E. DUNAIEVA³, I.S. VORONINA³, A.A. IONIN¹

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

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

³A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

TWO-PHOTON ABSORPTION IN $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ CRYSTAL DOPED WITH STRONTIUM

The phenomena of two-photon absorption of laser radiation with a wavelength of 515 nm in $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ and $\text{Ca}_{2.7}\text{Sr}_{0.3}(\text{VO}_4)_2$ crystals have been studied. The coefficient of two-photon absorption for these crystals is determined. It is shown that the doping of the $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ crystal with Sr atoms increases the band gap and reduces the two-photon absorption.

Интерес к исследованию кристалла $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ и его твердых растворов $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2\text{-Me}_3(\text{VO}_4)_2$ ($\text{Me}=\text{Sr}^{2+}, \text{Ba}^{2+}, \text{Pb}^{2+}$) обусловлен возможностью их использования при создании ВКР лазеров и других оптических систем [1]. Например, в работе [2] показано, что кристаллы ортованадата кальция, легированные ионами Tm^{3+} , могут успешно использоваться в качестве активной среды для лазеров, работающих в диапазоне 2000 нм. В работе [3] продемонстрирован синхронно-накачиваемый твердотельный ВКР-лазер на основе кристалла $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$.

В нашей работе для исследования двух-фотонного поглощения использовался оптоволоконный лазер на ионах иттербия с преобразованием его излучения во вторую гармонику. Длительность лазерного импульса составляла 0.3 пс, энергия E_{ex} до 3.4 мкДж, длина волны излучения $\lambda = 515$ нм. Лазерный импульс направлялся в образцы кристаллов $\text{Ca}_{2.7}\text{Sr}_{0.3}(\text{VO}_4)_2$ и $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ с помощью линзы с фокусным расстоянием $f_l = 90$ мм, обеспечивающей радиус фокальной перетяжки $\omega_0 = 26$ мкм. Измеренная зависимость пропускания образцов кристаллов от энергии падающего импульса представлена на Рис. 1.

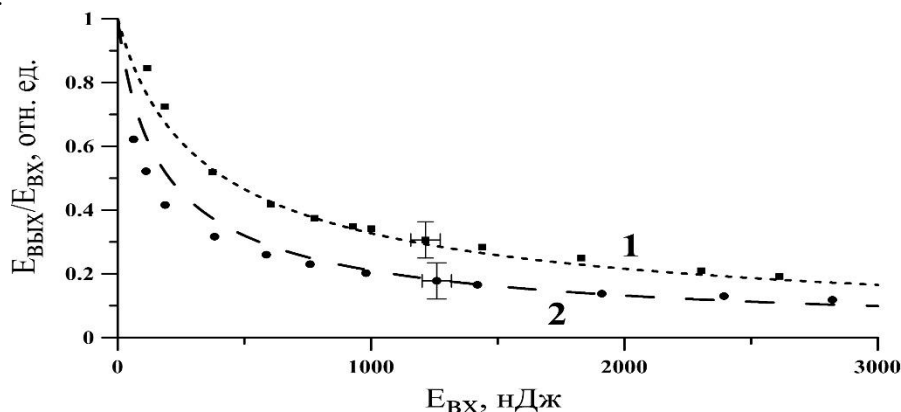


Рис. 1. Зависимость пропускания кристаллов $\text{Ca}_{2.7}\text{Sr}_{0.3}(\text{VO}_4)_2$ (1) и $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ (2) от энергии лазерного импульса

Используя экспериментальные данные, с помощью численных методов определен коэффициент двух-фотонного поглощения этих кристаллов для случая, когда поляризация излучения перпендикулярна оптической оси кристаллов, который составил (12 ± 2) см/ТВт и (25 ± 4) см/ТВт для кристаллов $\text{Ca}_{2.7}\text{Sr}_{0.3}(\text{VO}_4)_2$ и $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ соответственно. Из полученных результатов можно сделать вывод, что коэффициент двух-фотонного поглощения ниже для кристалла, легированного ионами стронция (~10%).

Список литературы

1. Brixner H., Flournoy P.A // J. Electrochem. Soc., 112, 303 (1965).
2. Ivleva L.I., Dunaeva E.E., Voronina I.S., Doroshenko M.E., Papashvili A.G. // J. Cryst. Growth, 501 (2018), pp. 18-21
3. Frank M., Smetanin S.N., Jelínek Jr M., Vyhlídal D., Ivleva L.I., Dunaeva E.E., Voronina I.S., Shukshin V.E., Zverev P.G., Kubecek V. // Laser Physics Letters., 17, 115402 (2020)

А.Р. СУВОРОВ, Д.А. СИНЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

УПРАВЛЯЕМОЕ ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР НА ТОНКИХ ПЛЁНКАХ ТИТАНА

В настоящей работе рассмотрены особенности устойчивой управляемой генерации лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) на тонких плёнках титана, напыленных на стеклянные подложки, под воздействием излучения Yb-волоконного лазера ($\lambda \approx 1,07$ мкм). Показано формирование одномерных и двумерных периодических рельефов, изучена зависимость контраста и процентом покрытия поверхности трека этими структурами при изменяющихся параметрах лазерного воздействия (длительность импульса, частота следования импульсов, средняя мощность, скорость сканирования).

A.R. SUVOROV, D.A. SINEV
ITMO University, St. Petersburg, Russia

CONTROLLED FORMATION OF REGULAR LATTICES BASED ON THERMOCHEMICAL LASER-INDUCED PERIODIC SURFACE STRUCTURES ON TITANIUM THIN FILMS

In the present work the features of stable controlled generation of laser-induced surface periodic structures (LIPPS) on thin titanium films sputtered on glass substrates under the influence of Yb-fiber laser radiation ($\lambda \approx 1.07 \mu\text{m}$) are considered. The formation of one- and two-dimensional periodic reliefs was shown; the dependence of the contrast and the percentage of coverage of the track surface by these structures at varying parameters of laser exposure (pulse duration, pulse repetition frequency, average power, scanning speed) was studied.

Индукцированные лазерным излучением периодические поверхностные структуры (ЛИППС), являются универсальным явлением, которое возникает на твердых телах при облучении линейно поляризованным лазерным излучением [1]. ЛИППС обычно возникают в виде рельефа поверхности, состоящего из (квази-) периодических линий, которые демонстрируют четкую корреляцию с длиной волны и поляризацией излучения. В работе [2] показано структурирование плёнки титана за счёт создания регулярного периодического рельефа под воздействием коммерчески доступного лазерного комплекса «МиниМаркер 2». При этом следует подчеркнуть, что создание двумерных решёток, представляющих интерес для задач современной фотоники, ранее было показано только в узких режимах ультракороткого лазерного воздействия в пределах лазерного пятна.

В данной работе продемонстрирована возможность устойчивого формирования двумерных ЛИППС на тонкой плёнке титана, получающаяся в результате наложения одномерных ЛИППС взаимно перпендикулярной ориентации. Показано, что оптические свойства полученных двумерных и одномерных структур отличаются в видимом диапазоне, что в перспективе позволит применить полученные результаты для задач создания новых элементов дифракционной оптики и современной фотоники. Работа поддержана грантом РФФ 21-79-10241.

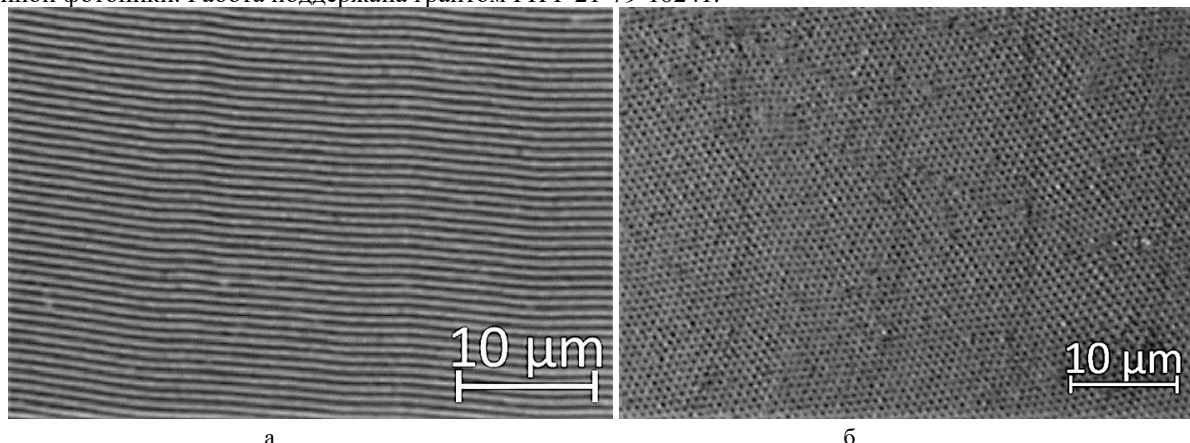


Рис.1. Одномерные (а) и двумерные (б) ЛИППС, полученные при воздействии излучения Yb-волоконного лазера мощностью $P=4$ Вт в импульсном режиме с длительностью импульса $\tau=4$ нс, частотой следования импульсов $f=40$ кГц, скоростью сканирования $0,1$ мм/с

Список литературы

1. Bonse J. et al. Laser-induced periodic surface structures—A scientific evergreen //IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2016. – Т. 23. – №. 3.
2. Sinev D. A. et al. Formation of the Submicron Oxidative LIPSS on Thin Titanium Films During Nanosecond Laser Recording //Nanomaterials. – 2020. – Т. 10. – №. 11. – С. 2161.

В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, С.А. УСПЕНСКИЙ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО Научно-технического объединения «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖЕК НА ФОРМИРОВАНИЕ КОРНЯ ШВА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН

Для определения влияния подложки на формирование корня шва выполнены проплавные швы по стальным пластинам различной толщины (10-16 мм) при одинаковых режимах лазерной сварки. В качестве подложек исследовались: канал заполненный инертным газом агроном высокой чистоты, стекловолоконная подложка и канал, заполненный флюсом.

V.N. PETROVSKIY¹, S.A. USPENSKIY^{1,2}

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

²IPG IRE-Polus, Fryazino, Moscow Region, Russia

INFLUENCE OF DIFFERENT SUBSTRATES ON THE FORMATION OF A WELD ROOT DURING LARGE THICKNESS STEEL LASER WELDING

To determine the effect of the substrate on the formation of the weld root, penetration welds were made on steel plates of various thicknesses (10–16 mm) under the same laser welding modes. The following substrates were studied: a channel filled with high purity argon inert gas, a fiberglass substrate, and a channel filled with flux.

При лазерной сварке больших толщин ввиду большой тепловой нагрузки часто образуются дефекты в корне шва такие как чрезмерное провисание шва, прерывистое образование капель или вогнутость корня шва [1-3]. Поэтому для получения качественного сварного соединения требуется обеспечить получение стабильного корня шва без дефектов.

Исследования проводились на пластинах из нержавеющей стали (316L) толщиной 10 и 12 мм, на пластинах из высокопрочной стали S900 толщиной 12 мм, на пластинах из стали 09Г2С толщиной 16 мм. Проплавные швы выполнялись на скоростях 5, 8,3 и 11,6 мм/сек. Мощность лазерного излучения подбиралась таким образом чтобы обеспечить стабильный проплав.

Согласно полученным данным применение подложки с флюсом или стекловолоконной подложки стабилизирует формирование корня шва на малых скоростях по сравнению с защитой корня шва только аргоном. Применение стекловолоконной подложки позволяет сформировать верх шва без подреза (но есть зависимость от марки стали и от мощности излучения).

Для стекловолоконной подложки требуется подбирать мощность лазерного излучения, при которой не происходит прожога подложки, для подложки с флюсом это не так критично. Стекловолоконная подложка, заполненная флюсом, не защищает от «утекания» шва при избыточной мощности лазерного излучения, но обеспечивает хорошую защиту и лучшее формирование корня шва.

Список литературы

1. J.J. Blecher, T.A. Palmer, T. DebRoy Mitigation of root defect in laser and hybrid laserArc welding Weld J, 94 (2015), pp. 73-82
2. T. Ilar, I. Eriksson, J. Powell, A. Kaplan Root humping in laser welding—an investigation based on high speed imaging Phys Procedia, 39 (2012), pp. 27-32
3. Frostevarg, J.. (2018). Factors affecting weld root morphology in laser keyhole welding. Optics and Lasers in Engineering. 101. 89-98. 10.1016/j.optlaseng.2017.10.005.

В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, С.А. УСПЕНСКИЙ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МЕДНЫХ ПЛАСТИН ТОЛЩИНОЙ 1,5 ММ

Приведены результаты исследования лазерной сварки медных пластин толщиной 1,5 мм при стыковом соединении. Исследовано влияние частоты развертки лазерного излучения и скорости сварки на формирование сварного шва. Проведены испытания на растяжение сваренных образцов согласно ГОСТ 6996.

V.N. PETROVSKIY¹, S.A. USPENSKIY^{1,2}

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

²IPG IRE-Polus, Fryazino, Russia

LASER WELDING OF COPPER PLATES 1.5 MM THICKNESS

The results of a study of laser welding of copper plates 1.5 mm thick with a butt joint are presented. The effect of laser radiation sweep frequency and welding speed on the formation of a welded seam was studied. Tensile tests of welded specimens were carried out in accordance with GOST 6996.

В связи с высокой отражающей способностью меди принято считать, что лазерная сварка изделий из этого материала нецелесообразна. Однако в современной промышленности периодически возникают задачи соединения деталей из меди и ее сплавов узкими сварными швами с глубоким кинжальным проплавлением. При этом по техническим причинам использование электронно-лучевой сварки не всегда возможно, а достаточно широкая доступность волоконных (длина волны 1,07 мкм) и дисковых (длина волны 1,03 мкм) технологических лазеров последнего поколения делает задачу лазерной сварки таких материалов актуальной [1-2].

Исследования проводились на медных пластинах 100x30 мм марки М1 толщиной 1,5 мм. Излучение волоконного лазера фокусировалось с помощью оптической сварочной головки с функцией развертки излучения. Верх и корень шва защищался с помощью инертного газа аргон высокой чистоты. Фокусировка излучения на поверхности пластины, лазерное излучение перпендикулярно поверхности пластины.

При выполнении проплавных швов без развертки излучения шов нестабилен, много выплесков из-за высокой плотности мощности. Сам же шов получается узкий. При расфокусировании излучения сразу же вначале сварки лазер выключается из-за сильного обратного отражения. Поэтому для увеличения ширины шва, а также для стабилизации ванны расплава используем развертку лазерного излучения с фокусировкой на поверхности пластин.

Для каждой скорости сварки выявлено что есть минимальная мощность лазерного излучения, выше которой не происходит выключения лазера из-за сильного обратного отражения.

Согласно внешнему виду проплавных швов, увеличение частоты развертки лазерного излучения стабилизирует ванну расплава, но при этом увеличивается подрез верха шва. При увеличении скорости сварки уменьшается подрез и провисание корня шва.

Сварены контрольные образцы в стык и проведены испытания на растяжения согласно ГОСТ 6996. По результатам испытания на растяжение предел прочности сваренного образца соответствует 74-96 % от прочности основного материала в соответствии со справочными характеристиками для сплава М1.

Список литературы

1. Шаскин В., Коржик В.Н., Чижская Т.Г., Судоретс В.М. Влияние поглощения лазерного излучения на эффективность лазерной сварки меди и ее сплавов // Автоматическая сварка. 2016. №11. С. 35-39.
2. Reisinger, U., Olschok, S. and Turner, C. (2016), Laser Beam Welding of Copper. LTJ, 13: 34-37.

В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, С.А. УСПЕНСКИЙ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО Научно-технического объединения «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА С АКСИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ПОРОШКА ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ С ЗАЗОРОМ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ТОЛЩИНОЙ 2,5 ММ

Рассмотрено формирование сварного шва при стыковой сварке стальных пластин толщиной 2,5 мм с аксиальной подачей порошка. Исследована возможность стыковой сварки пластин с зазором до 1 мм. Проведено сравнение прочностных характеристик с лазерной сваркой с присадочной проволокой.

V.N. PETROVSKIY¹, S.A. USPENSKIY^{1,2}

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

²IPG IRE-Polus, Fryazino, Russia

LASER WELDING WITH AXIAL POWDER FEED IN GAP BUTT WELDING OF STEEL PLATES 2.5 MM THICKNESS

The formation of a welded joint during butt welding of steel plates 2.5 mm thick with axial powder supply is considered. The possibility of butt welding of plates with a gap of up to 1 mm has been studied. The strength characteristics are compared with laser welding with filler wire.

Лазерная сварка — это производственный процесс, который позволяет соединять металлические детали, даже если точное позиционирование и подготовка сварочных кромок являются обязательными для успешной сварки. Использование наполнителя в сварном шве в виде проволоки или порошка может смягчить требования, связанные с этой проблемой [1-2].

Исследования проводились на пластинах толщиной 2,5 мм из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. В процессе сварки верх и корень шва защищались инертным газом аргон высокой чистоты. Использован порошок марки 316L.

Режимы сварки предварительно подбирались на проплавных швах по телу пластины. Затем на выбранном оптимальном режиме выполнена сварка встык без зазора (рис.1). Также выполнены стыковые швы с зазорами до 1 мм.

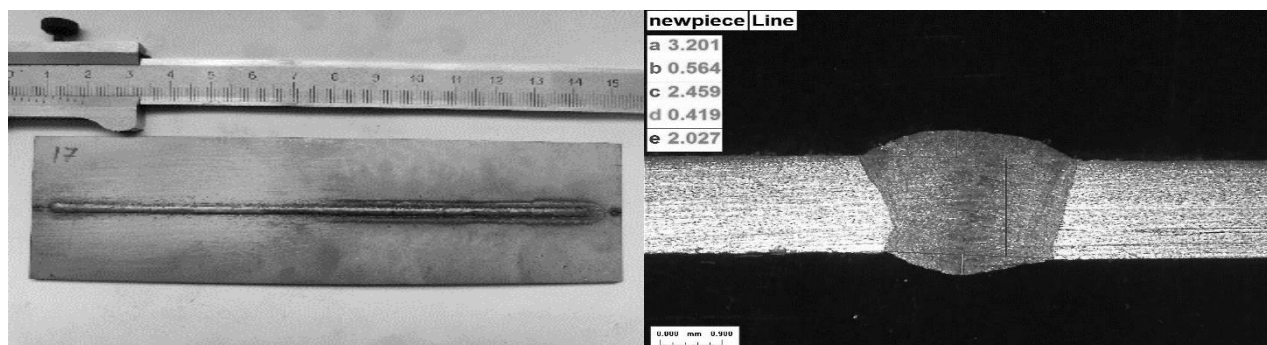


Рис. 1. Внешний вид и шлиф стыкового сварного соединения пластин (без зазора) из нержавеющей стали с коаксиальной подачей порошка

Сварены контрольные образцы в стык с начальным зазором 0,5 мм с использованием присадочной проволоки и с аксиальной подачей порошка и проведены испытания на растяжения согласно ГОСТ 6996. Согласно полученным данным швы с использованием присадочной проволоки и швы с подачей порошка обладают равной прочностью.

Список литературы

1. Sun Z. & Kuo M. Laser welding with powder feed // Science and Technology of Welding and Joining, 3:6, 279-285, DOI: 10.1179/stw.1998.3.6.279.
2. Errico V., Campanelli S.L., Angelastro A., Mazzarisi M., Casalino G. On the feasibility of AISI 304 stainless steel laser welding with metal powder // J. of Manufacturing Processes. 2020.56. P. 96-105.

В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹, С.А. УСПЕНСКИЙ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО Научно-технического объединения «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ЗАЗОРА ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ТОЛЩИНОЙ ОТ 1 ДО 6 ММ

Рассмотрено формирование сварного шва при сварке стальных пластин толщиной от 1 до 6 мм с различными зазорами и составлена карта применимости для процессов чисто лазерной сварки, лазерной сварки с разверткой излучения, и лазерной сваркой с разверткой и присадочной проволокой.

V.N. PETROVSKIY¹, S.A. USPENSKIY^{1,2}

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

²IPG IRE-Polus, Fryazino, Russia

INFLUENCE OF DIFFERENT SUBSTRATES ON THE FORMATION OF A WELD ROOT DURING LARGE THICKNESS STEEL LASER WELDING

The formation of a welded seam during welding of steel plates with a thickness of 1 to 6 mm with various gaps is considered and a map of applicability for the processes of pure laser welding, laser welding with wobbler, and laser welding with wobbler and filler wire is compiled.

В определенных случаях лазерная сварка имеет много преимуществ по сравнению с другими процессами соединения. Одним из преимуществ является возможность выполнения очень узких сварных швов благодаря малому размеру сфокусированного лазерного пятна. Однако это преимущество может быть и недостатком. Небольшой размер сфокусированного лазерного пятна требует тщательной подгонки детали. Если зазор или пространство между двумя деталями, подлежащими лазерной сварке, слишком велико, лазерный луч пройдет по центру и, возможно, не расплавит ни одну из сторон [1-2].

Исследования проводились на пластинах толщиной 1, 2 и 6 мм из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Использовалась оптическая головка с возможностью развертки лазерного излучения. В качестве присадочной проволоки использовалась проволока из нержавеющей стали толщиной 1 мм. В процессе сварки верх и корень шва защищались инертным газом аргоном высокой чистоты. Пластины предварительно собирались на прихватки с требуемым зазором и с помощью нормированных шупов проверялся итоговый зазор.

Для пластин из нержавеющей стали толщиной 1 мм получено, что формирование сварного соединения высокого качества согласно ГОСТ ISO 13919-1-201 возможно при:

- лазерной сварке без развертки и без присадочной проволоки с зазорами до 0,1 мм
- лазерной сварке с разверткой луча с зазорами до 0,2 мм
- лазерной сварке с присадочной проволокой и разверткой луча с зазорами до 0,5 мм.

Для пластин из нержавеющей стали толщиной 2 и 6 мм получено, что формирование сварного соединения высокого качества согласно ГОСТ ISO 13919-1-201 возможно при:

- лазерной сварке без развертки и без присадочной проволоки с зазорами до 0,1 мм
- лазерной сварке с разверткой луча с зазорами до 0,4 мм
- лазерной сварке с присадочной проволокой и разверткой луча с зазорами до 1 мм.

Согласно проведенным испытаниям на растяжение, прочность сварных соединений, выполненных с первоначальным зазором при сборке равна прочности сварных соединений без первоначального зазора, и соответствует 0.93-1 от прочности основного металла.

Список литературы

1. C. Lampa, J. Powell, A. Ivarson, H. Runnemalm, and C. Magnusson, "The influence of gap width on laser welding", ICALEO 1995, 504-512 (1995)
2. Aalderink, B. J., Pathiraj, B., & Aarts, R. G. K. M. (2010). Seam gap bridging of laser based processes for the welding of aluminium sheets for industrial applications. *International journal of advanced manufacturing technology*, 48(1-4), 143-154.

И.А. ФРОЛОВ¹, С.Р. АЛЛАЯРОВ¹, Е.М. ТОЛСТОПЯТОВ², А.В. УТКИН¹, П.Н. ГРАКОВИЧ²,
Л.Ф. ИВАНОВ², В.М. МАКАРЕНКО², Л.А. КАЛИНИН²

¹Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

²Институт Механики Металлополимерных Систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСА ОТДАЧИ ПРОДУКТОВ ИК ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛИСТИРОЛА И ПОЛИСТИРОЛА С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Исследовано формирование реактивной тяги, производимой продуктами лазерной абляции полистирола и полистирола с УНТ в вакууме. Реализована модель расчета механического импульса отдачи продуктов абляции на основе динамики гравиметрических зависимостей, полученных с использованием электронных микровесов.

I.A. FROLOV¹, S.R. ALLAYAROV¹, E.M. TOLSTOPYATOV², A.V. UTKIN¹, P.N. GRAKOVICH²,
L.F. IVANOV², V.M. MAKARENKO², L.A. KALININ²

¹Institute for Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

²V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

INVESTIGATION OF THE RECOIL PULSE OF PRODUCTS OF IR LASER ABLATION OF POLYSTYRENE AND POLYSTYRENE WITH CARBON NANOTUBES

The formation of a thrust developed by the products of the laser ablation of polystyrene and polystyrene with carbon nanotubes in vacuum was studied. A model for calculating the mechanical recoil momentum of ablation products based on dynamics of gravimetric dependences obtained with using electronic microbalances was implemented.

Анализ литературы [1-3] показывает, что одной из важнейших задач при разработке лазерно ракетного двигателя (ЛРД) является количественное определение импульса отдачи продуктов лазерного воздействия.

В качестве материала лазерных мишеней использовались полистирол и полистирол, допированный углеродными нанотрубками (УНТ), в форме плоских дисков. В процессе абляции регистрировалась суммарное действие развиваемой продуктами тяги и убыль массы мишени. Абляция выполнялась лазерным излучением мощностью 40 Вт.

Для сравнительного анализа импульса силы, наблюдаемой в ходе лазерной абляции (ЛА) различных материалов [1], используется следующая зависимость: $I = \int_0^t F_t(t) dt$, где I – импульс [мкН•с], F_t – создаваемое усилие на мишень [мкН•с] за время воздействия лазера t [с]. При этом особое внимание уделяется значению удельного механического импульса отдачи (C_m): $C_m = \frac{I}{E}$, где E – энергия лазерного луча [Дж], t_{max} – время достижения максимума показаний микровесов с момента начала облучения.

С использованием разработанной авторами модели [4] из гравиметрических кривых ЛА полистирола и композита полистирола с углеродными нанотрубками (УНТ) рассчитан механический импульс отдачи газообразных продуктов абляции. Полученные данные приведены в таблице.

Таблица. Рассчитанные параметры импульса отдачи

Материал мишени	V [мкН/с]	C_m [мкН/Дж]	I_{max} [мкН•с]	t_{max} [с]
ПС	100	6,0±0,2	402	4,2± 0,3
ПС+УНТ 0,37 %	78	7,3±0,2	446	6,2±0,3
ПТФЭ [4]	80	2,8±0,06	145	4,5± 0,3

Видно, что введение УНТ в полистирольную матрицу увеличивает удельный импульс отдачи, максимальный импульс и продлевает время возникновения максимального импульса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90004 и частичной финансовой поддержке Госзадания АААА-А19-119041090087-4. С белорусской стороны работа поддержана ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Полимерные материалы и технологии» задание 6,67.

Список литературы

1. Battocchio P., Terragni J., Bazzanella N., Cestari C., Orlandi M., Burger W. J., Battiston R., Miotello A. // Meas. Sci. and Tech., 2021. V. 32.P. 015901.
2. Резунков Ю.А. // Автореф. диссерт. на соиск. уч. степ. док. тех. н. Сосновый Бор, 2006.
3. Lakatosh B.V., Abramenko D.B., Ivanov V.V., Medvedev V.V., Krivtsov V.M., Koshelev K.N., Yakunin A.M. //Las. Phys. Let. 2017. V. 15. P. 016003.
4. Фролов И.А., Аллаяров С.Р., Толстопятов Е.М., Уткин А.В., Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Макаренко В.М.// Хим. выс. энерг. 2022. V.56. № 1. P.64-69.

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

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ НА ИНАКТИВАЦИЮ КОРОНАВИРУСА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ UVA ИЗЛУЧЕНИЕМ

В работе представлены методические основания определения дозы инактивации, обеспечивающей заданное снижение титра вируса под действием UVA излучения. Изучалось влияние объема, толщины слоя вирусосодержащей жидкости, расходимости излучения диодов на процесс фотинактивации вируса.

I.N. ZAVESOVSKAYA^{1,2}, V.A. GUSHCHIN³, L.I. RUSSU³, E.A. CHESHEV¹, A.L. KOROMYSLOV¹, I.M. TUPITSYN¹, A.A. FRONYA^{1,2}, M.S. GRIGORYEVA^{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*

INVESTIGATION OF THE IRRADIATION CONDITIONS INFLUENCE ON CORONAVIRUS INACTIVATION UNDER UVA RADIATION

In the report we present methodological grounds for determining the dose of inactivation that provides a given reduction in virus titer under the action of UVA radiation. The influence of the volume, thickness of the layer of the virus-containing liquid, the divergence of the radiation of the diodes on the process of photoinactivation of the virus was studied.

Анализ работ последних лет по инактивации патогенных микроорганизмов с использованием источников излучения с длинами волн в диапазоне UVA демонстрируют положительные результаты [1-5], что открывает путь к разработке технологии непрерывной инактивации вирусов и бактерий, что позволит в существенной степени предотвратить глобальное распространение инфекционных заболеваний.

В экспериментах по инактивации патогенов используются различные конструкции, модели источников UV излучения, которые имеют широкий разброс по выходным характеристикам излучения, в частности по мощности (Вт) и плотности мощности излучения (Вт/см²). В таких экспериментах при изучении влияния УФ излучения на процесс инактивации вирусов и бактерий учитывается именно дозовая нагрузка излучения (Дж/см²) на патогены. Эффект инактивации в значительной степени зависит от длины волны. Но на процесс инактивации влияют также характеристики облучаемого объекта, такие как концентрация патогена, питательная среда, в которой выращен, хранится и облучается патоген, наличие дополнительных сенсбилизаторов.

В рамках представленной работы исследовалось влияние объема и толщины слоя вирусосодержащей жидкости на процесс инактивации вируса. Также показано влияние расходимости излучения светодиодов на процесс облучения и инактивации вируса. В качестве объекта облучения был выбран бычий вирус как модельный вирус с меньшей степенью патогенности по сравнению с SARS-CoV-2. В качестве источника УФА излучения использовались светодиоды с длиной волны 371 нм и 401 нм. Вирусосодержащая жидкость помещалась в 96-луночных планшетах.

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

Список литературы

1. L. Horton, et al. Photochem. Photobiol. Sci. (2020) Vol.19, No.10, pp. 1262–1270
2. C. S. Heilingloh, Am. J. Infect. Control (2020) Vol.48, No.10, pp. 1273–1275
3. K. Song, et al. Water Res. (2019) Vol.163, p. 114875
4. R. de Santis, et al. medRxiv (2020) Vol.2, No. June
5. I.N. Zavestovskaya et al. Quantum Electron (2022) 52 83

Д.С. ЧУЧЕЛОВ¹, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ¹, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}, С.А. ЗИБРОВ¹,
К.М. САБАКАРЬ^{1,2}, В.П. ЯКОВЛЕВ²

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА, ВЫДЕЛЯЕМОГО ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ РЕЗОНАНСНЫХ АТОМНЫХ ЯЧЕЕК

Малогобаритные ячейки с атомами щелочных металлов нужны для атомных часов, магнитометров и гироскопов. При высокотемпературной герметизации ячеек внутрь попадают газы, растворенные в стекле, что может влиять на их характеристики. Предложен метод оценки давления этого газа по форме внутридоплеровского резонанса.

D.S. CHUCHELOV¹, M.I. VASKOVSKAYA¹, V.V. VASSILIEV¹, V.L. VELICHANSKY^{1,2}, S.A. ZIBROV¹,
K.M. SABAKAR^{1,2}, V.P. YAKOVLEV²

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

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

ESTIMATION OF GAS PRESSURE EMITTED IN THE LASER SEALING OF RESONANCE ATOMIC CELLS

Small-size cells with alkali atoms are needed in atomic clocks, magnetometers and gyroscopes. During high-temperature sealing of cells a part of gas solved in glass comes out and fills the cell. We estimate its pressure by analyzing the shape of Doppler-free resonance.

Резонансные ячейки с атомами щелочного металла требуются во многих типах квантовых сенсоров. В них используется оптическая накачка лазерным излучением, поэтому либо целиком, либо частично они изготавливаются из стекла. В большинстве случаев для их надежной герметизации необходима высокая температура, при которой из стекла в ячейку выделяются растворенные в нем газы. Неконтролируемая примесь газа может ухудшать стабильность атомных часов и приводить к ошибкам в других метрологических применениях.

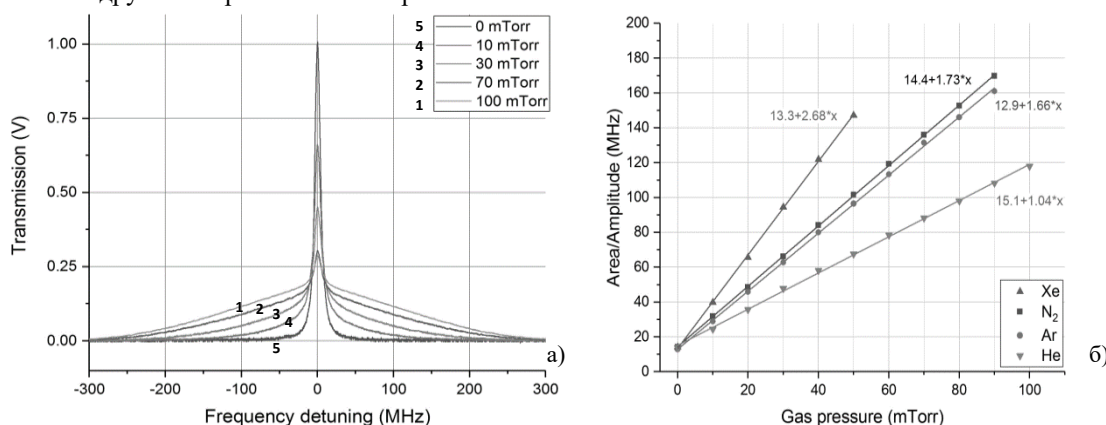


Рис. 1. а) резонансы при различных давлениях азота; б) зависимость отношения площади под кривой к амплитуде

При лазерной герметизации ячеек, предназначенных для стабилизации частоты лазеров по внутридоплеровским резонансам (ВДР) поглощения в Cs и Rb, обнаружено изменение ширины и формы этих резонансов, обусловленное примесным или буферным газом (БГ). Для исследования его влияния ВДР в D1 линии Cs регистрировался при изменении давления БГ контролируемым образом. Эволюция резонанса (без доплеровского фона) представлена на Рис 1а. Появление пьедестала обусловлено долгоживущим изменением населенностей на подуровнях основного состояния (из-за оптической накачки), которое «разбрасывается» при упругих столкновениях с атомами БГ по максвелловскому распределению атомов Cs по продольной скорости [1]. Обнаружено, что в практически важном диапазоне давлений БГ отношение площади под контуром резонанса к его амплитуде в максимуме - линейная функция давления БГ. Дано объяснение этого результата в рамках модели столкновений, предложенной в работе [2]. Линейность наблюдалась для четырех газов (с разными коэффициентами), Рис 1б. Для азота, который является основным газом, выделяющимся при герметизации, получена калибровочная зависимость. Ее применение позволит улучшить технологию лазерной герметизации. Заметим, что кроме количественной оценки давления в диапазоне 5-100 мТорр, оценку давления азота можно получить и в случаях, когда ВДР вообще не виден (> 100 мТорр) или, когда его ширина близка к естественной (< 3 мТорр).

Список литературы

1. Thornton D.E. et al. // Optics Communications. 2011. V. 284. P. 2890.
2. Smith P.W., Hänsch R. // Phys. Rev. Lett. V. 26. 1971. P. 740.

А.А. ШАМОВА, Д.С. ПОЛЯКОВ, Г.Д. ШАНДЫБИНА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ 3D НАКОПИТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

В работе представлен для обсуждения аналитический анализ 3D накопительного нагрева при облучении неорганических материалов и биологических тканей серией коротких и ультракоротких лазерных импульсов с помощью метода функций Грина. Для ряда случаев, представляющих практический интерес, получены универсальные аналитические зависимости накопленной температуры от числа лазерных импульсов и частоты их следования, а также обсуждены границы их применимости. Приведены примеры применения развиваемой теории для конкретных ситуаций воздействия импульсного лазерного излучения на различные материалы, в частности титан, монокристаллический кремний и костную ткань.

A.A. SHAMOVA, D.S. POLYAKOV, G.D. SHANDYBINA

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

UNIVERSAL MODEL OF 3D ACCUMULATIVE LASER HEATING OF INORGANIC MATERIALS AND BIOLOGICAL TISSUES

The report presents for discussion an analytical analysis of 3D accumulative heating during irradiation of inorganic materials and biological tissues by a series of short and ultrashort laser pulses using the Green's functions method. For a number of cases of practical interest, universal analytical dependences of the accumulated temperature on the number of laser pulses and their repetition rate are obtained, and the limits of their applicability are discussed. Examples of the application of the developed theory for specific situations of the impact of pulsed laser radiation on different materials, in particular titanium, monocrystalline silicon, and bone tissue, are given.

Проводимое в последние годы усовершенствование лазеров, генерирующих короткие и ультракороткие импульсы, способствует расширению областей их применения: активно развиваются технологии создания с их помощью различных функциональных микро- и нанорельефов (антиотражающих [1], гидрофобных/гидрофильных [2], антибактериальных [3] и т.д.) на поверхности металлов, полупроводников и в прозрачных средах; идёт поиск высокоэффективных режимов лазерной обработки твёрдых биотканей в ортопедии и стоматологии [4].

Важной особенностью технологий, основанных на многоимпульсном лазерном воздействии, является накопительный нагрев, который при отсутствии должного контроля за параметрами излучения способен привести к ухудшению качества обработки материалов [1]. Поэтому актуальной задачей является реализация управляемого накопительного нагрева. Решение такой задачи требует разработки универсальных моделей трёхмерного накопительного нагрева материалов различных типов под действием импульсного лазерного излучения. Несмотря на существенные различия в строении неорганических материалов и биотканей, при построении таких моделей могут применяться одни и те же аналитические методы теории теплопроводности. Стоит отметить, что существующие численно-аналитические модели не отличаются универсальностью по отношению к типу обрабатываемого материала и не позволяют проводить экспресс-анализ зависимости накопленной температуры от параметров лазерного излучения и свойств материала в условиях трёхмерного теплоотвода [5].

В работе представлен для обсуждения аналитический анализ 3D накопительного нагрева в условиях, когда длительность теплового действия лазерного импульса мала по сравнению с периодом следования импульсов. На основе метода функций Грина рассмотрено несколько видов тепловых источников: точечный, нитевидный, дископодобный, а также источник с гауссовым поперечным профилем интенсивности и экспоненциально спадающий с глубиной. Получены аналитические выражения для расчёта накопленной температуры, демонстрирующие характер её зависимости от числа импульсов и частоты их следования. В качестве примера применения развиваемой теории рассмотрена динамика накопительного нагрева титана при воздействии серии наносекундных лазерных импульсов в условиях достаточно острой фокусировки; сухой костной ткани под действием нано- и фемтосекундных лазерных импульсов ближнего ИК диапазона; монокристаллического кремния при облучении серией фемтосекундных лазерных импульсов. Показано, что при наложении определённых условий на пространственные размеры источника вдоль некоторых направлений для анализа накопительного нагрева оказывается неважным детальное знание о характере распределения выделяемой энергии в пространстве и времени.

Полученные результаты могут быть полезны для создания автоматизированных систем для обработки различных материалов серией коротких и ультракоротких лазерных импульсов в промышленности и для проведения безопасных операций в медицине.

Список литературы

1. Chen T., Wang W., Tao T., Zhang Y., Mei X. // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2021. V. 164. P. 120532.
2. Verma N., Anoop K.K., Dominic P., Philip R. // *J. Appl. Phys.* 2020. V. 128. № 13. P. 135304.
3. Lutey A.H.A., Gemini L., Romoli L., Lazzini G., Fuso F., Faucon M., Kling R. // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. P. 1.
4. Zhang J., Guan K., Zhang Z., Guan Y. // *Opt. Express.* 2020. V. 28. № 17. P. 25528.
5. Taylor L.L., Scott R.E., Qiao J. // *Opt. Mater. Express.* 2018. V. 8. № 3. P. 648.

А.Е. ШЕПЕЛЕВ¹, А.А. АНТИПОВ^{1,2}, А.Г. ПУТИЛОВ^{1,2}, К.М. СТАНКЕВИЧ², И.И. ПРИВОНОВ²

¹ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура, Россия

²Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОЛЛИМАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА

Проведены исследования диаграммы направленности излучения квантово-каскадного лазера. По результатам исследований для коллимации излучения выполнен расчет одиночной германиевой асферической линзы. Выполнена оценка параметра качества коллимированного излучения квантово-каскадного лазера.

A.E. SHEPELEV¹, A.A. ANTIPOV^{1,2}, A.G. PUTILOV^{1,2}, K.M. STANKEVICH², I.I. PRIVODNOV²

¹ILIT RAS – Branch of FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Shatura, Russia

²Vladimir state university, Vladimir, Russia

OPTICAL SYSTEM FOR COLLIMATION OF QUANTUM-CASCADE LASER RADIATION

The radiation pattern of a quantum-cascade laser has been studied. Based on the results of studies for the collimation of radiation, a single germanium aspherical lens was calculated. The quality parameter of the collimated radiation of a quantum-cascade laser is estimated.

Благодаря сочетанию различных уникальных свойств, таких как компактность, высокая эффективность и относительно высокая мощность генерируемого оптического излучения, квантово-каскадные лазеры (ККЛ) нашли ряд применений в многочисленных приложениях современной науки и техники [1].

Пространственные параметры и характеристики лазерного излучения, как энергетические и спектральные, являются важнейшими свойствами, определяющими возможность и эффективность практического использования ККЛ. При этом внедрения ККЛ в различные приложения требуют разработки качественной оптики с хорошими абберационными характеристиками для эффективной и точной коллимации и фокусировки излучения [2].

В работе методом сканирования пучка выполнена регистрация диаграммы направленности излучения с длиной волны 8 мкм ККЛ. Экспериментально установлено, что полный угол, характеризующий ширину диаграммы направленности по «быстрой» оси составил 120 градусов, по «медленной» - 96 градусов, что соответствует значениям числовой апертуры 0,87 и 0,74 соответственно. В соответствии с полученными результатами выполнен расчет оптической системы для коллимации излучения ККЛ. В качестве такой системы предложено использовать одиночную германиевую асферическую линзу, основные параметры которой представлены в таблице.

Таблица. Основные параметры линзы

Параметр	Числовое значение
Рабочая длина волны, мкм	8
Заднее фокусное расстояние, мм	4,00
Толщина по оси, мм	2,5
Задний фокальный отрезок, мм	3,85
Радиус кривизны первой поверхности, мм	51,041087
Радиус кривизны второй поверхности, мм	34,471017
Коэффициенты асферики второй поверхности	$\alpha_1 = -0,047494$ $\alpha_2 = 8,008518 \times 10^{-4}$ $\alpha_3 = -2,153099 \times 10^{-5}$
Коническая постоянная второй поверхности	36,698129

Моделирование фокусировки излучения ККЛ, преобразованного предлагаемой линзой, позволило теоретически определить расходимость и параметр качества излучения по «быстрой» и «медленной» осям. Установлено, что значение диаметра пучка в фокальной плоскости фокусирующей линзы по «быстрой» оси составило 7,7 мм, по «медленной» оси – 7,3 мм, что соответствует полному углу расходимости 77 мрад и 73 мрад соответственно. При этом параметр качества излучения по «быстрой» и по «медленной» осям составил 9,2 и 4,7 соответственно.

Заключение и выводы.

В данной работе экспериментально определена ширина диаграммы направленности излучения ККЛ. Для коллимации излучения предложено и обосновано использование асферической линзы из германия. При помощи моделирования показано, что использование данной линзы позволяет уменьшить полный угол расходимости излучения.

Список литературы

1. Путилов А.Г. Исследование генерационных характеристик квантово-каскадного лазера среднего ИК-диапазона. Сборник научных трудов X Международной конференции по фотонике и информационной оптике. 2021. С. 99-100.
2. Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Мильников В.Ю., Бабичев А.В. и др. Исследование пространственных характеристик излучения квантовых каскадных лазеров для спектрального диапазона 8 мкм. Письма ЖТФ. 2020. Том 46, вып. 22.

МНОГОСЕКТОРНЫЕ БИНАРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

Представлены результаты применения изготовленных на плавленном кварце лазерно-индуцированной микроплазмой многосекторных бинарных фазовых пластин для формирования из Гауссова пучка пространственно-разделенных дифракционно-ограниченных пятен, окружающих по периметру центральную область с интенсивностью, стремящейся к нулю.

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

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

MULTISECTOR BINARY PHASE PLATES FOR MULTIPLEXING OF LASER BEAMS

The research presents the results of using multisection binary phase plates fabricated by laser-induced microplasma on fused silica for formation of spatially separated diffractive limited spots, encircling over perimeter of the central area with intensity reducing to zero, from a Gaussian beam.

На сегодняшний день в области научных исследований значительное внимание уделяется новому типу фазовых оптических элементов – многосекторным бинарным фазовым пластинам (МБФП) [1, 2], осуществляющим в дальнем поле мультиплицирование Гауссова пучка в серию пространственно-разделенных дифракционно-ограниченных пятен (ДОП), окружающих по периметру центральную область с интенсивностью, стремящейся к нулю. Для изготовления МБФП могут быть применены литографические методы и прямая лазерная запись фемтосекундными импульсами [1].

В настоящей работе мы предлагаем для изготовления на плавленном кварце МБФП, обеспечивающих разницу фаз π , использовать технологию обработки прозрачных диэлектриков лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП) (рис. 1а) [3]. Работоспособность изготовленных на длину волны $\lambda = 1.064$ мкм МБФП подтверждается их тестированием в оптической схеме с применением ПЗС камеры, а также при лазерной обработке пластины нержавеющей стали.

Для функционирования МБФП с разницей фаз π глубина травления секторов должна соответствовать значению $h = \lambda/2(n - 1)$ [1], где n – показатель преломления материала МБФП. Поскольку процесс формирования микрорельефа путем травления прозрачного оптического материала технологией ЛИМП включает в себя два этапа преобразования энергии: от лазерного излучения к плазме и от плазмы к энергии разложения и разрушения материала, его результаты не зависят напрямую от характеристик лазерного излучения [3]. В связи с отсутствием прямой аналитической зависимости между глубиной травления и режимами лазерного излучения выбор параметров лазерного облучения для изготовления МБФП осуществлялся экспериментально. Измеренная на контактном профилометре глубина травления изготовленных МБФП составила 1.180 ± 0.010 мкм с шероховатостью поверхности в области воздействия ЛИМП 50 ± 10 нм (рис. 1а).

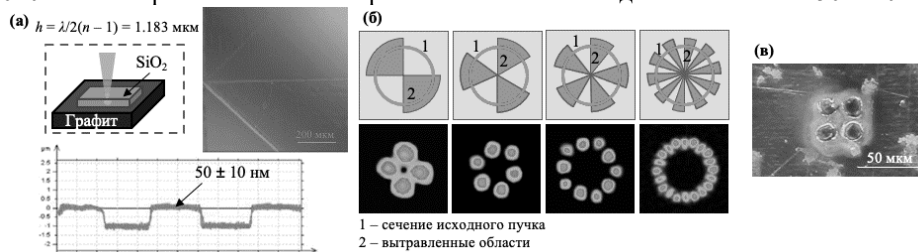


Рис. 1. МБФП: (а) изготовление, (б) тестирование с ПЗС камерой, (в) результаты обработки стальной пластины

На рис. 1б представлены результаты регистрации распределения интенсивности в дальнем поле, полученные с применением изготовленных МБФП. Видно, что количество формируемых в дальнем поле ДОП соответствует количеству секторов в МБФП, а при числе секторов, превышающем 10, в формируемом распределении происходит увеличение эллиптичности и сближение ДОП. Рис. 1в показывает отпечаток, полученный абляцией на образце полированной нержавеющей стали. Видно, что ДОП имеют одинаковый размер и форму, близкую к кругу.

Результаты одновременной обработки стального образца демонстрируют реальные перспективы применения МБФП как для лазерной обработки металлов, так и для лазерной обработки других материалов.

Работа поддержана Российским научным фондом [проект № 20-71-10103].

Список литературы

1. Zhou L. et al. // High Power Laser Sci. 2018. Vol. 6, № е6. P. 1–5.
2. Khonina S. N., Volotovskiy S. G. // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. Vol. 27, №. 10. P. 2188–2197.
3. Veiko V. P. et al. // Quantum Electron. 2017. Vol. 47, №. 9. P. 842–848.

А.С. ЩЕКИН^{1,2}, А.К. ЖАНАБАЕВА¹, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

ВЛИЯНИЕ ВИДА ТЕКСТУРЫ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ КРЕМНИЯ ПРИ ПРЯМОМ НАНОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ТЕКСТУРИРОВАНИИ

Представлено исследование поведения капли жидкости на поверхности текстурированного материала в зависимости от вида паттерна и характеристик паттерна. Проведено исследование по влиянию соотношения площади обработанной и не обработанной части поверхности на краевой угол смачивания при различных стратегиях обработки.

A.S. SHCHEKIN^{1,2}, A. K. ZHANABAEVA¹, V. N. PETROVSKI¹

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

²IPG IRE-Polus, Fryazino, Russia

EFFECT OF TEXTURE TYPE ON THE WETTABILITY OF SILICON DURING DIRECT NANOSECOND LASER WRITING

A study of the behavior of a liquid droplet on the surface of textured material depending on the type of pattern and the characteristics of the pattern is presented. A study was conducted on the effect of the ratio of the treated and untreated surface area on the contact angle for different treatment strategies.

При помощи прямого лазерного структурирование можно изменять топографию поверхности, что приводит к изменению поверхностных свойств материала.

Изменение свойств поверхности при помощи лазерного излучения находит широкое применения во многих областях науки и техники. Оно позволяет повышать или понижать адгезию бактерий [1], изготавливать самоочищающиеся поверхности [2] и улучшать трибологические свойства [3] металлов, полимеров и керамик. В последние годы особое распространение получили работы, связанные со структурированием поверхности различных материалов для изменения их смачиваемости. Структура поверхности играет ключевую роль в смачиваемости материалов. Основными факторами, которые оказывают влияние на смачиваемость, являются топография поверхности и ее химический состав [4].

Цель данной работы – определение влияния вида паттерна текстуры на смачиваемость монокристаллического кремния при прямом наносекундном лазерном текстурировании. Монокристаллический кремний выбран как модельный и доступный материал. Также с учетом моделей смачивания Вензеля и Касси-Бакстера проведено исследование по влиянию отношения площади обработанной поверхности к площади необработанной на краевой угол смачивания для различных паттернов.

Для определения влияния характеристик лазерного излучения на формирование текстуры на поверхности материала и поведения краевого угла смачивания на получаемой текстуре рассмотрены две стратегии формирования паттернов: столбчатая структура (рис.1) и точечная (рис.2).

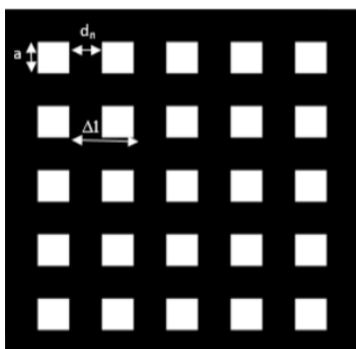


Рис. 1. Схема текстуры «столбики». Черным цветом обозначены области обработки. a – размер столбика, d_n – диаметр пучка, Δl – расстояние между столбиками

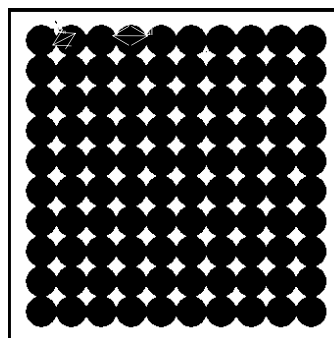


Рис. 2. Схема структуры «точки». d_n – диаметр пучка, Δl – расстояние между ямками

Список литературы

1. Liu K, Yao X and Jiang L // Chem. Soc. Rev. 2010. 39 3240–55
2. Qian H, et. al. // Mater. Sci. Eng. 2017. С 80 566–77
3. Xu W C, Shi J Z., et al. // Mater. Res. Innov. 2015. 19 207–10
4. Wang D, Sun Q., et al. // Nature. 2020. 582 55–9.

В.М. ЯМЩИКОВ

Институт лазерных физических исследований, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ АТОМОВ КАЛИЯ, НА ВРЕМЯ ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Решена задача о распространении люминесцентных фотонов в резонансно поглощающей газовой среде, состоящей из атомов калия и гелия. С использованием метода Монте-Карло проведены численные эксперименты, моделирующие реальные процессы, происходящие в камере, которая предназначена для определения времени жизни индивидуального атома в возбужденном состоянии с помощью метода измерения времени затухания интенсивности люминесценции.

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 problem of propagation of luminescent photons in a resonantly absorbing gaseous medium consisting of potassium and helium atoms is solved. Using the Monte Carlo method, numerical experiments were carried out to simulate real processes occurring in a chamber designed to determine the lifetime of an individual atom in an excited state using the method of measuring the decay time of the luminescence intensity.

При экспериментальной регистрации изменения интенсивности люминесцентного излучения во времени из-за эффектов пленения могут получаться значения, отличные от среднего времени жизни индивидуального атома [1,2]. Это связано с тем, что люминесцентный фотон, прежде чем попасть на измерительный прибор может на своем пути поглотиться атомом и, спустя некоторое время, заново переизлучиться в произвольном направлении. Описанный процесс может повториться несколько раз, а значит, время жизни люминесцентного фотона внутри камеры увеличится. Следовательно, увеличится время затухания люминесцентного сигнала.

Целью данной работы является исследование влияния многократного рассеяния люминесцентных фотонов в среде, состоящей из атомов К, на время затухания люминесцентного свечения. С помощью численного эксперимента, алгоритм которого описан и реализован, определены следующие зависимости времени затухания люминесцентного излучения от:

- 1) концентрации паров атомов К;
- 2) расстояния между лазерным пучком и окном, через которое ведется наблюдение затухания люминесцентного излучения;
- 3) отстройки частоты диагностического лазера от частоты резонансного перехода атома К.

Список литературы

1. Саутенков В.А., Аршинова И.Д., Бобров А.А., Вильшанская Е.В., Кудринский Д.А., Зеленер Б.Б. Перенос излучения в атомных парах высокой плотности при различной отстройке пробного лазера от резонансного перехода // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. №4. Ч.1. с. 6.
2. Huennekens J. Radiation trapping in sodium-noble-gas mixtures / J. Huennekens, H. J. Park, T. Colbert and other // Physical review A. – 1987. – Vol. 35(7). – P. 2829 - 2901.

Секция
ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., профессор
Кудряшов Николай Алексеевич

Секретарь секции

– к.ф.-м.н., доцент
Рябов Павел Николаевич

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9072

E-mail: pnryabov@mephi.ru

М.С. ОЛИВЕЙРА^{1,2}, М. ЮСУПОВ^{1,3}, Р.М. КОРДЕЙРО², А. БОГАРТС¹

¹Антверпенский университет, Антверпен, Бельгия

²Федеральный университет АВС, Сан-Паулу, Бразилия

³Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

КАК ЛИПИДНЫЕ АЛЬДЕГИДЫ РАСПРЕДЕЛЯЮТСЯ В ФАЗОВО-РАЗДЕЛЕННЫХ МЕМБРАНАХ: РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выполнены компьютерные моделирования для исследования процессов распределения окисленных липидов (а именно липидных альдегидов) в фазово-разделенных мембранах, состоящих из жидко-упорядоченных и жидко-неупорядоченных доменов. Обнаружено, что липидные альдегиды, полученные из мононенасыщенных липидов, имеют тенденцию накапливаться на границе между жидко-упорядоченным и жидко-неупорядоченным доменами, тогда как те, полученные из полиненасыщенных липидов, остаются в жидко-неупорядоченном домене.

M.C. OLIVEIRA^{1,2}, M. YUSUPOV^{1,3}, R.M. CORDEIRO², A. BOGAERTS¹

¹University of Antwerp, Antwerp, Belgium

²Universidade Federal do ABC, São Paulo, Brazil

³Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies ASUZ, Tashkent, Uzbekistan

HOW LIPID ALDEHYDES ARE DISTRIBUTED IN PHASE-SEPARATED MEMBRANES: INSIGHTS FROM COMPUTER SIMULATIONS

Computer simulations were carried out to investigate the distribution processes of oxidized lipids (namely, lipid aldehydes) in phase-separated membranes consisting of liquid-ordered and liquid-disordered domains. It was found that lipid aldehydes derived from mono-unsaturated lipids tend to accumulate at the interface between the liquid-ordered and liquid-disordered domains, whereas those derived from polyunsaturated lipids remain in the liquid-disordered domain.

Reactive oxygen and nitrogen species generated by cold atmospheric plasma are able to oxidize the lipids presented in cell membrane, producing a complex mixture of different lipid oxidation products [1]. One of these products are the lipid aldehydes (LAs), which are able to increase the membrane permeability even at low concentrations [2]. However, it is not yet clear how LAs are distributed in phase-separated membranes (PSMs), which are responsible for the transport of selected molecules (e.g., chemotherapeutic drugs) and for intracellular signaling.

Thus, in this research, applying the coarse-grained molecular dynamics simulations we investigate the distribution of LAs in a PSM consisting of liquid-ordered (Lo) and liquid-disordered (Ld) domains; Lo domain is composed of 1,2-dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholine (DPPC) lipids and cholesterol (ChL) molecules, whereas Ld domain contains 1,2-dilinoleoyl-sn-glycero-3-phosphocholine (DIPC) lipids and LAs, where the latter are derived from either mono-unsaturated POPC lipids (POPC-ALD) or poly-unsaturated DIPC lipids (DIPC-ALD).

Simulation results reveal that after 12 μ s of equilibration, LAs derived from mono-unsaturated lipids (i.e., POPC-ALD) tend to accumulate at the interface between the Lo/Ld domains, whereas those derived from polyunsaturated lipids (i.e., DIPC-ALD) remain in the Ld domain (see green lines in Figure 1A and 1B). This means that not only oxidized acyl chains affect the distribution of LAs in PSMs, but also the structure of the lipids (saturation or unsaturation) plays an important role.

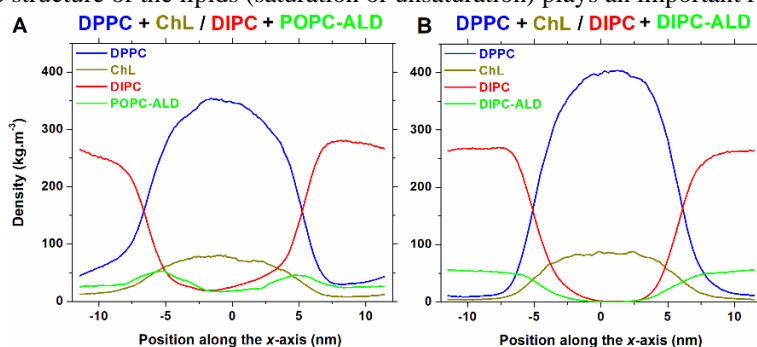


Fig. 1. Density profile of the coarse-grained model membranes.

These results are important for understanding the effects caused by lipid oxidation on membrane structure, properties and organization during plasma treatment.

References

1. X. Lu, et al., *Physics Reports*, 630, 1-84 (2016).
2. K. A. Runas and N. Malmstadt, *Soft Matter*, 11, 499-505 (2015).

М.С. ОЛИВЕЙРА^{1,2}, М. ЮСУПОВ^{1,3}, Р.М. КОРДЕЙРО², А. БОГАРТС¹

¹Антверпенский университет, Антверпен, Бельгия

²Федеральный университет АВС, Сан-Паулу, Бразилия

³Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

ПЕРЕНОС РЕАКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И АЗОТА ЧЕРЕЗ НИТРИРОВАННЫЕ МЕМБРАНЫ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Выполнены компьютерные моделирования для изучения влияния нитрования липидов на процессы проникновения реактивных форм кислорода и азота (РФКА) через фосфолипидный бислой (ФЛБ), используемый в качестве простой модельной системы для клеточной мембраны. В частности, показаны профили свободной энергии проникновения РФКА через нативные и нитрированные ФЛБ.

M.C. OLIVEIRA^{1,2}, M. YUSUPOV^{1,3}, R.M. CORDEIRO², A. BOGAERTS¹

¹University of Antwerp, Antwerp, Belgium

²Universidade Federal do ABC, São Paulo, Brazil

³Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies ASUz, Tashkent, Uzbekistan

TRANSLOCATION OF REACTIVE OXYGEN AND NITROGEN SPECIES ACROSS NITRATED MEMBRANES: A MOLECULAR DYNAMICS STUDY

Computer simulations are performed to study the effect of lipid nitration on the permeation processes of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) through phospholipid bilayer (PLB) used as a simple model system for cell membrane. Specifically, the permeation free energy profiles of RONS across native and nitrated PLBs are shown.

Reactive oxygen and nitrogen species (RONS) generated by cold atmospheric plasma (CAP) can induce nitro-oxidative stress in cancer cells, thereby leading to their death. However, it is still unclear how RONS permeate the cell membrane to cause nitro-oxidative damage. In our previous investigations, using molecular dynamics (MD) simulations, we studied the effect of oxidation caused by CAP on RONS permeation across native and oxidized membrane [1]. Since plasma can also cause nitration in cell membranes [2], it is equally important to study the process of RONS translocation across nitrated membranes. Hence, in this study, we performed MD simulations using the umbrella sampling method to calculate the free energy profiles of RONS across nitrated membranes. Specifically, we investigated the translocation of hydrophilic (H_2O_2 , HO_2 , OH , $ONOOH$) and hydrophobic (O_2 , NO_2 , NO) RONS through nitrated phospholipid bilayer (PLB) used as a simple model system for cell membrane (Figure 1). Our simulation results revealed that HO_2 and $ONOOH$ species have relatively low free energy barriers compared to H_2O_2 and OH , being more prone to permeate the nitrated PLB than for the native or peroxidized PLBs, thereby having the permeation barrier similar to aldehyde-oxidized PLB. We also found that O_2 , NO_2 and NO species have insignificant barriers for penetration across nitrated PLB, similar to that of the oxidized PLB.

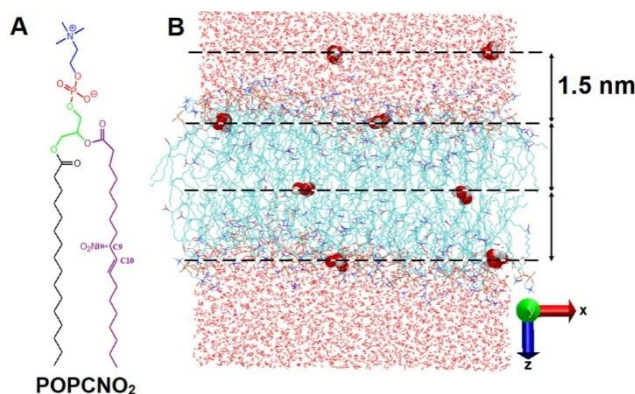


Fig. 1. Structure of a single nitrated 1-palmitoyl-2-oleoyl-sn-glycero-3-phosphocholine (POPC) lipid, i.e., POPCNO₂(A) and one of the model membranes (B) used in our simulations.

Overall, nitrated membranes are more permeable than native and/or peroxidized membranes, which indicates that nitrated membranes should also be considered together with oxidized membranes, to better understand the effect of CAP induced nitro-oxidative stress in cancer cells.

References

1. J. Razzokov, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 51, 365203 (2018).
2. M.C. Oliveira, et al., *Comput. Biol. Med.*, 136, 104768 (2021).

А.В. АКСЕНОВ¹, А.Д. ПОЛЯНИН², В.Г. СОРОКИН²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт проблем механики им.А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ ПОСТРОЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ УРЧП БЕЗ ЗАПАЗДЫВАНИЯ И С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Точные решения уравнений математической физики всегда играли и продолжают играть огромную роль в формировании правильного понимания качественных особенностей многих явлений и процессов в различных областях естествознания. Точные решения нелинейных уравнений наглядно демонстрируют и позволяют лучше понять механизмы таких сложных нелинейных эффектов, как пространственная локализация процессов переноса, множественность или отсутствие стационарных состояний при определенных условиях, существование режимов с обострением, возможная негладкость или разрывность искомых величин и др.

Предложен ряд простых, но достаточно эффективных, методов построения точных решений нелинейных уравнений с частными производными (УрЧП) без запаздывания и с запаздыванием, которые обычно проводят к небольшому объему промежуточных вычислений. Эффективность предложенных методов иллюстрируется конкретными примерами. Описан достаточно общий метод построения точных решений нелинейных УрЧП с пропорциональными аргументами, который основан на использовании принципа аналогии решений.

A.V. AKSENOV¹, A.D. POLYANIN², V.G. SOROKIN²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, Moscow, Russia

²Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

ABOUT SOME METHODS OF CONSTRUCTING EXACT SOLUTIONS NON-LINEAR PDEs WITHOUT DELAY AND WITH DELAY

Exact solutions of equations of mathematical physics have always played and continue to play a huge role in the formation of a correct understanding of the qualitative features of many phenomena and processes in various fields of natural science. Exact solutions of nonlinear equations clearly demonstrate and allow us to better understand the mechanisms of such complex non-linear effects as spatial localization of transfer processes, the multiplicity or absence of stationary states under certain conditions, the existence of modes with blow-up, possible non-smoothness or discontinuity of the initial quantities, etc.

A number of simple, but quite effective, methods for constructing exact solutions of nonlinear partial differential equations (PDEs) without delay and with delay, which are usually carried out to a small quantity of intermediate calculations, are described. The effectiveness of the proposed methods is illustrated by concrete examples. A fairly general method of constructing exact solutions of nonlinear PDEs with proportional arguments is described, which is based on the use of the principle of analogy of solutions.

Список литературы

1. Aksenov A.V., Polyanin A.D. Methods for constructing complex solutions of nonlinear PDEs using simpler solutions // *Mathematics*. 2021. V. 9. № 4. С. 1-31.
2. Полянин А.Д., Сорокин В.Г., Журов А.И. Дифференциальные уравнения с запаздыванием: свойства, методы, решения и модели. М.: Издательство «ИПМех РАН». 2022. 464 с.

Д.В. АЛЯБЬЕВ, И.Д. ЯДГАРОВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Ташкент, Узбекистан

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ ФУЛЛЕРЕНОВ ПРИ ИХ НАГРЕВАНИИ

Методами молекулярной динамики, рассмотрена динамика изменений радиусов фуллеренов C₂₀ и C₆₀ в зависимости от их температуры в диапазоне 10-600К. Результаты показали неизменность радиусов фуллеренов с ростом температуры.

D.V. ALYABEV, I.D. YADGAROV

Institute of Ion-plasma and laser technology, Tashkent, Uzbekistan

ANALYSIS OF CHANGES IN THE GEOMETRY OF FULLERENES AFTER THEIR HEATING

The dynamics of changes in the raduses of fullerenes C₂₀ and C₆₀ depending on their temperature in the range of 10-600K is considered by methods of molecular dynamics. The results showed the invariance of the radii of fullerenes with increasing temperature.

К настоящему времени, большое внимание уделяется получению эндодральных фуллеренов путем рассеяния на них некоторых атомов (к примеру, Fe, N, [1-2]). К примеру, комплекс N@C₆₀ представляет практический интерес. Очевидно, что температура фуллеренов влияет на процессы взаимодействия рассеиваемых атомов и сечение рассеяния такого процесса. В настоящей работе приведены результаты моделирования влияния температуры на геометрию фуллеренов методами молекулярной динамики (LAMMPS). Координаты фуллеренов были взяты с [3-4]. Модельный эксперимент был проведен по следующей схеме: минимизация энергии C₆₀, C₂₀ – нагревание фуллеренов с обнулением нескомпенсированных линейного и углового моментов (в диапазоне температур 10-600К с шагом температуры 10К, 1600 фуллеренов C₂₀ и 2500 фуллеренов C₆₀ для каждой температуры) – вычисление средних радиусов фуллеренов в зависимости от температуры.

На рис. 1 приведены графики распределений длин радиус-векторов атомов фуллеренов относительно центра масс для некоторых температур.

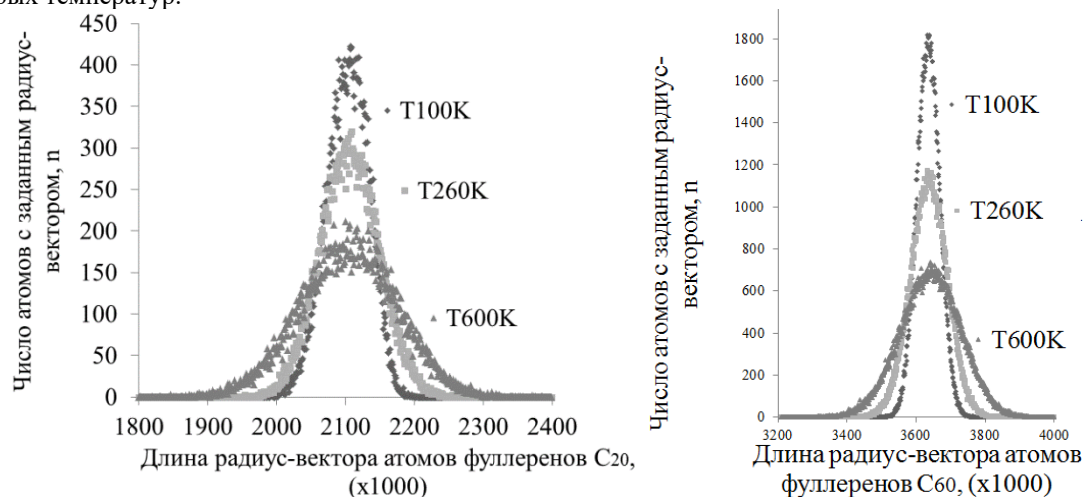


Рис. 1. Функции распределения длин радиус-векторов атомов фуллеренов для некоторых температур

Как видно из графиков, распределение радиусов имеет колоколообразную форму. Предварительный анализ показал, что распределение радиус-векторов подчиняется нормальному распределению. Анализ полученных данных показал, что средний радиус фуллеренов C₆₀ и C₂₀, определенный как среднее модулей радиус-векторов атомов углерода при фиксированной температуре, практически не меняется с ростом температуры: $\bar{R}_{20} = 2.106 \pm 0.003 \text{ \AA}$, $\bar{R}_{60} = 3.636 \pm 0.001 \text{ \AA}$. Таким образом, можно увидеть, что при повышении температуры амплитуда «радиальных» колебаний атомов в фуллеренах увеличивается таким образом, что средний радиус не меняется.

Список литературы

1. «Synthesis of endohedral iron-fullerenes by ion implantation», H. Minezaki et al //Review of scientific instruments, 2014.
2. J. U. Ahamed et al Transactions of the Materials Research Society of Japan 34(4):773-776, DOI:10.14723/tmrsj.34.773,2009.
3. Arkadiy S. Baltenkov «Spherical Coordinates of Carbon Atoms in C₂₀ Fullerene Cage»// arxiv.org/pdf/1812.07878.pdf.
4. Arkadiy S. Baltenkov, Valery K. Dolmatov, and Steven T. Manson, PHYSICAL REVIEW A, 66, 023201 (2002).

А.А. БАЙРАМУКОВ, Н.А. КУДРЯШОВ, А.А. КУТУКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРОГРАММНЫЙ КОД ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛИНОМОВ, СВЯЗАННЫХ С ТОЧЕЧНЫМИ ВИХРЯМИ НА ПЛОСКОСТИ

Разработаны архитектура и алгоритм работы программы, автоматизирующей тестирование полиномов для определения стационарных конфигураций вихрей. Введенные пользователем полиномы подставляются в дифференциальные уравнения, связанные с известными стационарными конфигурациями вихрей, и, при образовании тождества, делается заключение о принадлежности данных полиномов соответствующей стационарной конфигурации вихрей.

A.A. BAYRAMUKOV, N.A. KUDRYASHOV, A.A. KUTUKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

PROGRAM CODE FOR TESTING POLYNOMIALS ASSOCIATED WITH POINT VORTICES ON THE PLANE

An architecture and operation algorithm of the program that automates the testing of polynomials to determine the stationary configurations of vortices are developed. The polynomials entered by the user are substituted into the differential equations associated with the known stationary configurations of vortices, and, when an identity is formed, a conclusion is made about the belonging of these polynomials to the corresponding stationary configuration of vortices.

Вихревое движение — одно из распространенных явлений в природе [1]. Известно, что система дифференциальных уравнений, описывающая движение системы N точечных вихрей, допускает стационарные решения — решения, при которых геометрия положения точечных вихрей на плоскости в любой момент времени подобна геометрии начального положения точечных вихрей. Такие начальные положения точечных вихрей называют стационарными, а их классы эквивалентности относительно преобразований — конфигурациями точечных вихрей [2]. На данный момент установлены множества конфигураций точечных вихрей на плоскости [3–5]. С использованием полиномиального метода получены дифференциальные уравнения, имеющие полиномиальные решения, корни которых на комплексной плоскости определяют стационарное положение вихрей.

Дифференциальные уравнения, соответствующие конфигурациям точечных вихрей, выводятся при некоторых допущениях о положениях точечных вихрей. В докладе для дифференциального уравнения $D[f, z] = D(f^{(n)}, \dots, f', f, z)$, связанного с фиксированным стационарным положением вихрей, получено соотношение

$$E[f, z] = D\left(\frac{1}{a^n} f^{(n)}, \dots, \frac{1}{a^2} f'', \frac{1}{a} f', f, az + b\right),$$

где $E[f, z]$ — обобщенное дифференциальное уравнение, f — неизвестная функция, z — независимая переменная, n — порядок исходного дифференциального уравнения, a и b — параметры обобщенного дифференциального уравнения, связанные с преобразованиями растяжения, поворота и сдвига плоскости.

Универсальный метод, позволяющий для произвольного полинома точно определить, соответствуют ли его корни некоторой конфигурации вихрей, в настоящее время отсутствует. В работе предложен алгоритм тестирования полиномов для определения их соответствия стационарной конфигурации вихрей путём перебора дифференциальных уравнений известных конфигураций и проверки каждого из них на соответствие ему заданных полиномов. Для проверки полиномов, исходя из тестируемых полиномов и обобщенного дифференциального уравнения, составляется система алгебраических уравнений относительно параметров обобщенного дифференциального уравнения. Существование решения этой системы означает, что корни тестируемых полиномов образуют рассматриваемую стационарную конфигурацию. Разработана архитектура и алгоритм работы программы, автоматизирующей тестирования полиномов. Программа реализована на языке программирования *Maple*.

Список литературы

1. Борисов А.В., Мамаев И.С. Математические методы динамики вихревых структур. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. С. 368.
2. O'Neil K. A. Stationary Configurations of Point Vortices // Trans. Am. Math. Soc. 1987. V. 302. №2. P. 383–425.
3. Aref H. On the equilibrium and stability of a row of point vortices // J. Fluid. Mech. 1995. V. 290. P. 167–181.
4. Aref H. Vortices and polynomials // Fluid Dynamics Research. 2007. V. 39. Issues 1–3. P. 5–23.
5. Demina M. V., Kudryashov N. A. Point Vortices and Polynomials of the Sawada-Kotera and Kaup-Kupershmidt Equations // Regul. Chaotic Dyn. 2011. V. 16. № 6. P. 562–576.

С.П. БАУТИН¹, В.Е. ЗАМЫСЛОВ², А.Г. ОБУХОВ³

¹Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия
²Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия
³Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

В работе трехмерными нестационарными расчетами моделируются течения в тропическом циклоне до и после внешнего воздействия на него. При выборе конкретного способа внешнего энергетического воздействия установлено разрушение тропического циклона и переход течения воздуха в нем в неструктурированное движение.

S.P. BAUTIN¹, V.E. ZAMISLOV², A.G. OBUKHOV³

¹Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia
²Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia
³Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF DESTRUCTION TROPICAL CYCLONES

In this work, three-dimensional unsteady calculations are used to model currents in a tropical cyclone before and after an external impact on it. When choosing a specific method of external energy impact, the destruction of a tropical cyclone and the transition of the air flow in it into an unstructured movement is established.

В докладе приведены основные результаты созданной в последние годы газодинамической теории восходящих закрученных потоков [1-3], которые в природе встречаются в виде торнадо, тропических циклонов и огненных вихрей. Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют перейти к практическим применениям созданной газодинамической теории восходящих закрученных потоков. Одним из важных для практики результатов этой теории являются рекомендации по раннему обнаружению и уничтожению торнадо [4]. Другое приложение теории – создание вихревого энергогенератора, в котором с помощью специально созданного потока воздуха будет производится электрическая энергия из кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси. Следующее приложение газодинамической теории восходящих закрученных потоков представлено в этом докладе как результат соответствующих трехмерных нестационарных расчетов течений газа. С их помощью моделируется как возникновение и последующий выход тропического циклона на стационарный режим, так и его уничтожение с применением разумных энергетических затрат. С использованием явной разностной схемы, позволяющей провести распараллеливание вычислений, численно строятся решения полной системы уравнений Навье-Стокса. При этом учитываются сжимаемость газа, эффекты вязкости и теплопроводности, а также действие сил тяжести и Кориолиса. Результаты расчета одного конкретного циклона, расположенного в Северном полушарии, следующие. Возникновение восходящего вертикального движения в первоначально покоящемся в поле силы тяжести воздухе породило поток со все усиливающейся закруткой газа в соответствующем направлении. Движение воздуха в возникшем циклоне вышло на стационарное состояние за 72 часа 55 минут. Диаметр циклона составляет 350-370 км; диаметр глаза циклона 65-70 км. Максимальная скорость вращательного движения равна 83 м/с. Кинетическая энергия различных движущихся потоков в циклоне такова: $5.599 \cdot 10^{17}$ Дж у вращающейся части циклона; $2.406 \cdot 10^{14}$ Дж у вертикального движения. Следовательно, у тропического циклона, вышедшего на стационарный режим, кинетическая энергия вращательного движения воздуха в нем в тысячу раз больше кинетической энергии вертикального движения воздуха в циклоне. После применения внешнего воздействия, прервавшего вертикальное движение воздуха, поток примерно за 26 часов 15 минут перешел в неструктурированное движение, то есть разрушился.

Список литературы

1. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса Новосибирск: Наука, 2008. 96 с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г., Баутин К.В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука, 2013. 216 с.
3. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. Екатеринбург: УрГУПС, 2020. 400 с.
4. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Проблема предсказания и уничтожения смерча // Технологии гражданской безопасности. 2016. Т. 13. №9 1(47). С. 70-75.

С.П. БАУТИН, Ю.В.НИКОЛАЕВ, Е.И.ПОНЬКИН

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ»,
Снежинск, Россия*

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МИШЕНЯМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

На примере рассмотрения мишеней для лазерного термоядерного синтеза, используемых на американской установке NIF, обсуждаются причины предлагаемых рекомендаций по изменениям мишеней и ожидаемые последствия этих изменений. В том числе, возможное повышение устойчивости течения сжатия, а также определенная экономия энергии внешнего воздействия.

S.P. BAUTIN, Y.V. NIKOLAEV, E.I. PONKIN

Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia

RECOMMENDATIONS FOR TARGETS FOR LASER FUSION

Using the example of laser fusion targets used at the American NIF facility, the reasons for the proposed recommendations for target changes and the expected consequences of these changes are discussed. In particular, a possible increase in the stability of the compression flow, as well as a certain saving of energy from external influences.

С учетом ранее [1] и вновь полученных результатов по математическому моделированию процессов сильного сжатия идеального газа [2-5] высказываются некоторые рекомендации по изменению мишеней для реализации лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) на примере для американской установки NIF.

Предлагаемы рекомендации по мишеням для ЛТС: контейнер для мишени делать не цилиндрическим, а сферическим; в качестве мишени брать не шар, а тетраэдр, у которого внешние грани должны быть вогнутыми к центру мишени; в геометрический центр мишени помещать твердый сердечник, повторяющий общую геометрию мишени; возможно покрывать мишень слоем золота.

Предлагаемые рекомендации сделают процесс сильного сжатия мишеней для ЛТС более устойчивым, потребуются меньшие энергетические затраты на получение соответствующей физической реакции, но при этом степень сжатия мишени возрастет.

Список литературы

1. Баутин С.П. Мишень для получения термоядерных реакций // Патент РФ 2432627, МПК G21B 1/19(2006.01). Заявка 2010113417/07 от 06.04.2010. Опубликовано 27.10.2011. Бюллетень № 30.
2. Баутин С.П., Николаев Ю.В. Численное решение задачи о сжатии газа из покоя в покой // Вычислительные технологии. 2020. Т.25, № 5. С. 55-65.
3. Баутин С.П., Николаев Ю.В. Численное решение задачи о сжатии газа при заданном законе воздействия // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26, № 6. С. 20–32.
4. Баутин С.П., Понькин Е.И. Автомодельные решения задачи об истечении политропного газа в вакуум с косою стенки // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62, № 1. С. 32-42.
5. Понькин Е.И. Математическое описание двух способов газодинамического воздействия на мишень с использованием решения Сучкова // Вопросы атомной науки и техники, серия «Математическое моделирование физических процессов». 2022 (в печати).

К.В. БРУШЛИНСКИЙ^{1,2}, В.В. КРЮЧЕНКОВ¹, Е.В. СТЕПИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ РАВНОВЕСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ, ОКРУЖАЮЩИХ ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Доклад посвящен анализу устойчивости кольцевых плазменных конфигураций, окружающих прямой проводник с током и не соприкасающихся с ним. Представлены результаты численного решения линеаризованной МГД-задачи для малых одномерных возмущений, зависящих только от радиуса, и двумерных – не зависящих от продольной координаты. Результаты будут сопоставлены с исследованиями устойчивости тех же конфигураций спектральным методом.

K. V. BRUSHLINSKI^{1,2}, V. V. KRYUCHENKOV¹, E. V. STEPIN^{1,2}

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

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

DYNAMICS COMPUTATION OF SMALL PERTURBATIONS OF EQUILIBRIUM PLASMA CONFIGURATIONS SURROUNDING ELECTRIC CURRENT CONDUCTOR

The lecture is devoted to analysis of stability of ring plasma configurations surrounding a straight electric current conductor without a contact with it. The results of numerical solution of the linearized MHD problem for small one-dimensional perturbations depending on radius only and two-dimensional ones which are not depending on a longitudinal coordinate are presented. These results will be compared with the stability studies of the same configurations provided by a spectral method.

Доклад продолжает серию численных исследований устойчивости равновесных плазменных конфигураций в магнитных ловушках-галатеях, в которых удерживающее магнитное поле создается проводниками с током, погруженными в объём ловушки. Простейшим элементом конфигураций в таких ловушках является плазменное кольцо, окружающее прямой проводник и не соприкасающееся с ним. В отличие от традиционного анализа спектра дифференциального оператора линеаризованной МГД-задачи (см. [1] с соответствующей библиографией) здесь проведена серия расчётов поведения со временем малых возмущений конфигурации, не зависящих от продольной координаты z , в терминах прямого численного решения упомянутой двумерной задачи.

Для простоты и общности вначале рассмотрены только одномерные возмущения, зависящие от радиуса r . Они не растут со временем при всех допустимых значениях параметров задачи в отсутствие возмущений радиальной компоненты магнитного поля. Если допустить её возмущение в начальных данных, то оставаясь постоянным со временем, оно вызывает нетривиальный рост неравномерной по радиусу азимутальной скорости. Основное содержание доклада связано с анализом поведения со временем двумерных возмущений и его сопоставлением с результатами, полученными ранее спектральным методом.

Список литературы

1. Brushlinskii K.V., Stepin E.V. Stability Issues in Two-Dimensional Mathematical Models of Plasma Equilibrium in Magnetic Galathea Traps // Diff. Eq. 2021. V. 57. No. 7. pp. 835-847.

А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ ДЕТАЛЕЙ В СРЕДЕ ANSYS WORKBENCH

Проведено моделирование процесса закалки образцов лазером непрерывного действия. Получено численное решение задач нестационарной теплопроводности и термоупругости по исследованию температурного поля и напряженно-деформированного состояния при лазерной закалке образцов для различных параметров термообработки. С помощью среды ANSYS Workbench исследовано влияние режимов термообработки на температурное поле и термонапряжения.

A.I. VERAMEICHYK

Brest State Technical University, Brest, Belarus

SIMULATION OF THE PROCESS OF LASER HARDENING OF PARTS IN ANSYS WORKBENCH

Modeling of process of training of samples is carried out by the laser of continuous action. A numerical solution of problems of non-stationary thermal conductivity and thermoelasticity was obtained for the study of temperature field and stress-strain state during laser hardening of samples for various parameters of heat treatment. The ANSYS Workbench has investigated the effects of heat treatment on the temperature field and thermal stress.

Падающий на поверхность обрабатываемой детали лазерный пучок можно представить как локализованный тепловой источник определенной интенсивности, поэтому задачи о нагреве материалов лазерным излучением могут быть рассмотрены с использованием закономерностей теплопроводности. В соответствии с этим проведено математическое и компьютерное моделирование процесса закалки лазерным лучом детали в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $200 \times 20 \times 7$ мм из легированной стали 40X13. Моделирование процесса лазерной закалки в ANSYS Workbench 2019 R2 проводится в два этапа. На первом этапе в модуле *Transient Thermal* рассматривается нестационарная задача теплопроводности по определению температурного поля в детали при нагреве ее поверхности движущимся высококонцентрированным источником тепла. На втором этапе с помощью модуля *Static Structural* выполняется статический прочностной анализ.

Построение геометрической модели детали выполнено с использованием графического модуля ANSYS SpaceClaim. Механические и термодинамические характеристики материала задавались зависящими от температуры с помощью модуля *Engineering Data*.

В соответствии со скоростью движения лазера к узлам конечно-элементной модели пошагово последовательно прикладывалась тепловая нагрузка вдоль оси симметрии сначала верхней, а затем нижней поверхности моделей. Плотность мощности в поперечном сечении лазерного пучка, которая распределяется по закону нормального распределения Гаусса, определялась в зависимости от мощности лазера и площади лазерного воздействия. Расчет проводился для мощности лазерного излучения $1,2 \text{ кВт}$, диаметра лазерного пятна на поверхности 2, 3, 4 мм. Для моделирования распространения температуры вглубь детали создан макрос для ANSYS на языке программирования APDL, т.к. принималось, что тепловой поток распределяется по диаметру пятна нагрева по закону, близкому к распределению Гаусса. На всех поверхностях модели задавалась конвекция с различными коэффициентами теплоотдачи с учетом того, что он зависит от характера движения лазера, его физических свойств, размеров и формы поверхности, направления теплового потока и т.д. Начальная температура принималась равной $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Расчет теплового поля и напряженно-деформированного состояния (НДС) проводился для скоростей движения источника тепла 500, 700, 1000 мм/мин.

В результате теоретических исследований созданной конечно-элементной модели получены результаты решения задачи теплопроводности в виде линий равного уровня, отражающих распределение температуры в упрочняемых образцах. По результатам исследований установлено, что зона термического воздействия лазерного луча в поперечном сечении модели имеет форму сегмента. Получены зависимости температурного поля от времени и координат. Результаты теплового анализа, проведенные в модуле *Transient Thermal*, сохраняются в отдельном файле и используются при проведении статического анализа (определении НДС) модели в качестве внешней нагрузки.

На втором этапе в модуле *Static Structural* на базе ANSYS Mechanical решается задача термоупругости по исследованию напряженно-деформированного состояния в модели при воздействии движущегося высококонцентрированного источника тепла, моделирующего лазерный луч.

По результатам компьютерного моделирования исследовано влияние скорости движения лазерного луча, диаметра лазерного пятна и глубины закалки на температурное поле и компоненты НДС. Установлено, что неравномерность распределения температур приводит к структурной неоднородности в зоне лазерного воздействия и к появлению значительных температурных напряжений.

Полученные результаты температурного и статического анализа могут использоваться для определения оптимальных режимов работы лазеров и геометрических размеров установок для лазерной закалки.

В.Л. КАМЫНИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОБ ИСТОЧНИКЕ ДЛЯ МНОГОМЕРНОГО НЕРАВНОМЕРНО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

Доказаны теоремы существования и единственности решения обратной задачи определения зависящей от неизвестной функции источника в вырождающемся параболическом уравнении со многими независимыми переменными. В качестве дополнительного условия задается условие интегрального наблюдения. Приведен пример обратной задачи, для которой выполняются условия доказанных в работе теорем. Полученные результаты для обратной задачи основаны на предварительном исследовании однозначной разрешимости соответствующей прямой задачи, которое представляет также и самостоятельный интерес.

V.L. KAMYNIN

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

DIRECT AND INVERSE SOURCE PROBLEM FOR A MULTIDIMENSIONAL NONUNIFORMLY PARABOLIC EQUATION

We prove existence and uniqueness theorems for inverse problems of determining the space-dependent unknown source function in a degenerate parabolic equation with many independent variables. The additional condition is given in the form of integral observation. An example of an inverse problem is given for which the conditions of the theorems proved in the paper are satisfied. The results obtained for the inverse problem are based on a preliminary study of the unique solvability of the corresponding direct problem, which is also of independent interest.

Изучается существование и единственность обобщенного решения $\{u(t, x), p(x)\}$ обратной задачи для параболического уравнения

$$\rho(t, x)u_t - \Delta u + (\bar{b}(x), u_x) + c(t, x)u = p(x)g(t, x) + r(t, x), \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$u(0, x) = u_0(x), x \in \Omega, (t, x) \in [0, T] \times \partial\Omega, \quad (2)$$

и дополнительным условием интегрального наблюдения

$$\int_0^T u(t, x)\omega(t)dt = \varphi(x). \quad (3)$$

Здесь $(t, x) \in Q = [0, T] \times \Omega$, Ω - ограниченная область в n -мерном пространстве с гладкой границей $\partial\Omega$.

Особенностью постановки обратных задач является предположение о том, что уравнение (1) не является равномерно параболическим, а именно, для него выполнено условие

$$0 \leq \rho(t, x) \leq \rho_1, \frac{1}{\rho(t, x)} \in L_q(Q), q > 1.$$

Установлены достаточные условия, при которых решения обратной задачи (1)-(3) существует и единственно. Приведены примеры, показывающие, что такие условия выполняются, если T достаточно велико (при фиксированном l), либо если величина l достаточно мала (при фиксированном T).

Отметим, что ранее аналогичные результаты для обратной задачи восстановления правой части уравнения (1) при дополнительном условии (3) были установлены для случая одной пространственной переменной в [1,2].

Список литературы

1. Prilepko A.I., Kamynin V.L., Kostin A.B.// Jour. Inverse and Ill-posed Problems. 2018.Vol. 26, № 4, P. 523-539.
2. Hussein M.S., Lesnic D. Kamynin V.L., Kostin A.B.// Jour. Inverse and Ill-posed Problems. 2020.Vol. 28, № 3, P. 425-448.

К.В. КАН, Н.А. КУДРЯШОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ВОЛН, ОПИСЫВАЕМЫХ ОБОБЩЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УРАВНЕНИЕМ ШРЕДИНГЕРА

В работе приведено численное решение нелинейного уравнения Шредингера с произвольным коэффициентом отражения с учетом периодических граничных условий.

K.V. KAN, N.A. KUDRYASHOV

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

NUMERICAL MODELLING OF TWO WAVES INTERACTION DESCRIBING BY THE GENERALIZED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION

Numerical solution of nonlinear Schrodinger equation with arbitrary refractive index taking into account periodical boundary conditions is presented.

Рассматривается нелинейное дифференциальное уравнение в виде [1]:

$$iu_t + \alpha u_{xx} + (a|u|^n + b|u|^{2n})u = 0,$$

где i - мнимая единица, α - положительный параметр, n - показатель преломления. Аналитическое решение для оптических солитонов было найдено с помощью метода, предложенного в работе [2].

Численное решение в данной работе построено для случаев при $n = 1, 2$ с применением метода, описанного в [3]. В качестве начальных условий взята сумма двух уединенных волн, удаленных друг от друга в начальный момент времени, аналогично [4].

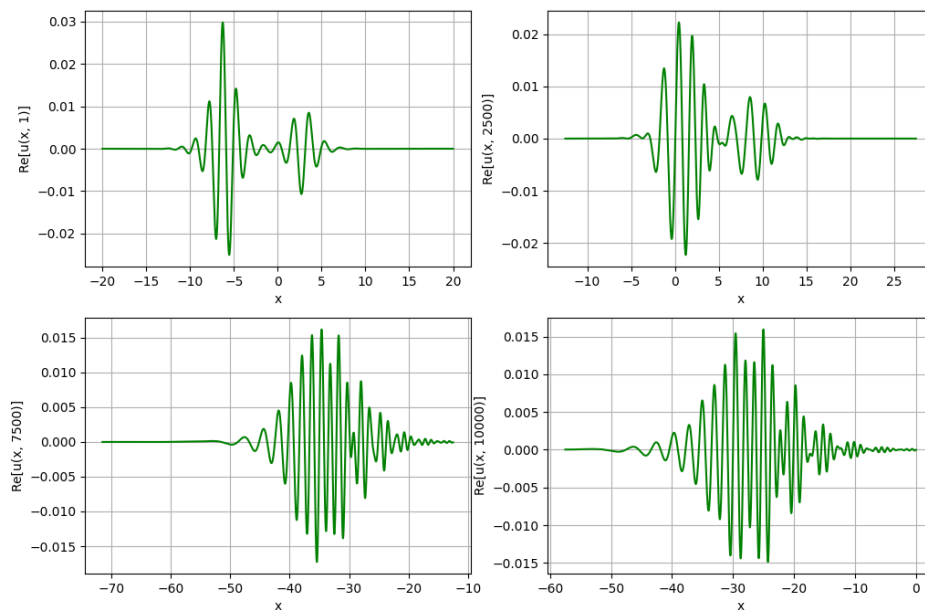


Рис. 1. Графики численного решения взаимодействия двух волн при $n=1$, $h=0.005$, $\alpha_1 = 28$, $\alpha_2 = 12$, $\tau = 1.25 \cdot 10^{-5}$

Список литературы

1. Kudryashov, N.A., and Lavrova S.F. Dynamical properties of the generalized model for description of propagation pulses in optical fiber with arbitrary refractive index. *Optik* 245: 167679, 2021.
2. Kudryashov, N.A. Optical solitons of mathematical model with arbitrary refractive index. *Optik*, 224:165391, 2020.
3. Weideman, J. A. C., and B. M. Herbst. Split-step methods for the solution of the nonlinear Schrödinger equation. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 23.3: 485-507, 1986.
4. Verwer, J. G. Conservative and Non. conservative Schemes for the Solution of the Nonlinear Schrodinger Equation. *IMA journal of Numerical analysis* 6: 25-42, 1986.

И.М. КОЗЛОВ¹, А.В. ТЕТЕРЕВ¹, Л.К. СТАНЧИЦ¹, Н.И. МИСЮЧЕНКО¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ В АДИАБАТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ИЛИ В ТЕРМОСТАТЕ

Разработана модель горения водорода в парогазовой смеси в адиабатическом реакторе или в термостате. Построенный на ее основании программный комплекс позволяет моделировать динамику химической кинетики с различным количеством компонент смеси и переменным числом уравнений реакций. Он предназначен для решения задач горения однородной по пространству газовой смеси с целью тестирования, как используемых наборов химических реакций, так и значений констант скоростей реакций.

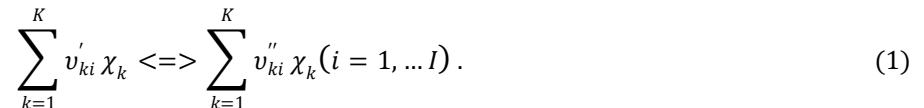
I.M. KOZLOV¹, A.V. TETEREV¹, L.K. STANCHITS¹, N.I. MISUCHENKO¹

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

SIMULATION OF CHEMICAL KINETICS COMBUSTIBLE MIXTURE IN ADIABATIC REACTOR OR THERMOSTAT

A model of hydrogen combustion in a vapor-gas mixture in an adiabatic reactor or in a thermostat has been developed. The software package built on its basis makes it possible to simulate the dynamics of chemical kinetics with a different number of mixture components and a variable number of reaction equations. It is designed to solve the problems of combustion of a gas mixture homogeneous in space in order to test both the sets of chemical reactions used and the values of the reaction rate constants.

Обратимые элементарные реакции с участием K химических соединений могут быть представлены в общем виде следующим образом:



Здесь I – общее количество реакций. Стехиометрические коэффициенты v_{ki} являются целыми числами, а χ_k это символ для k -ого химического соединения. Верхний индекс ' означает прямой стехиометрический коэффициент, а индекс '' означает стехиометрический коэффициент обратной реакции.

Переменная скорости роста q_i для i -ой реакции определяется как разность скоростей прямой и обратной реакции:

$$q_i = k_{fi} \prod_{k=1}^K [X_k]^{v'_{ki}} - k_{ri} \prod_{k=1}^K [X_k]^{v''_{ki}}. \quad (2)$$

Здесь $[X_k]$ – мольная концентрация k -ого химического соединения, а k_{fi} и k_{ri} – константы скоростей прямой и обратной реакций соответственно. Тогда скорость изменения концентрации k -ого соединения $\dot{\omega}_k$ с учетом всех реакций, в котором оно участвует, будет составлять:

$$\dot{\omega}_k = \sum_{i=1}^I (v''_{ki} - v'_{ki}) q_i = \frac{d}{dt} [X_k].$$

Если в реакции для ее активации необходима третья частица (+M) как, например, в реакциях диссоциации и рекомбинации, то переменная скорости роста, определяемая выражением (2), умножается на среднюю мольную концентрацию смеси [M]:

$$q_i \Rightarrow [M]q_i.$$

Предполагается, что температурная зависимость констант скорости реакции подчиняется обобщенному закону Аррениуса [1]. В этом случае энергия активации разлагается в степенную последовательность от температуры:

$$k_f = AT^b \exp\left(-\frac{E_0 + E_1T + E_2T^2 + \dots}{T}\right).$$

Здесь энергия активации выражается в единицах температуры.

В программном обеспечении реализована возможность использования различных схем прямых и обратных реакций при моделировании химической кинетики, включая и брутто модели химических реакций. Проведены параметрические расчеты по воспламенению, горению и детонации для различных участков диаграммы Шапиро [2] для смеси водород-воздух-пар.

Список литературы

1. Бартльме Ф. Газодинамика горения: Пер. с нем. Москва: Энергоиздат, 1981, С. 280.
2. Юрьев Ю.С., Витушкина Н.М., Зайцев А.А. Вероятностная оценка возгорания и детонации водорода в объемах защитной оболочки АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010. № 3. С. 12-17.

А.В. КРЯНЕВ, А.С. КОННОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЁХ СХЕМ: СХЕМЫ МАРКОВИЦА, СХЕМЫ VaR И СХЕМЫ, ОСНОВАННОЙ НА ВЕРОЯТНОСТЯХ ПРИОРИТЕТА

В докладе представлено сравнение эффективных портфелей, рассчитанных с помощью трёх схем: схемы Марковица, VaR-схемы и новой схемы основанной на вероятностях приоритета. Представлены численные результаты сравнения эффективных портфелей, рассчитанных согласно этим трем схемам. В качестве распределяемого ресурса рассматривался инвестиционный капитал, а показателя эффективности - коэффициент наращения капитала.

A.V. KRYANEV, A.S. KONNOVA

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

COMPARISON OF DISTRIBUTION OF RESOURCES IN THE PRESENCE OF UNCERTAINTY USING THREE SCHEMES FOR THE FORMATION OF EFFECTIVE PORTFOLIOS: MARKOWITZ SCHEME, VaR SCHEME, SCHEME BASED ON THE PROBABILITY OF PRIORITY

The report presents a comparison of efficient portfolios calculated using three schemes: the Markowitz scheme, the VaR scheme and the new scheme based on priority probabilities. Numerical results of comparison of effective portfolios calculated according to these three schemes are presented. Investment capital was considered as a distributed resource, and the coefficient of capital accumulation was considered as an indicator of efficiency.

В настоящее время при постановке задач распределения ресурсов в условиях неопределенности в мире широко используются две известные схемы формирования эффективных портфелей – схема Марковица [1-3] и VaR – схема [4]. Два года назад была предложена новая схема формирования эффективных портфелей, основанная на расчете вероятностей приоритета [5]. В докладе представлены результаты численных экспериментов сравнения эффективных портфелей, сформированных согласно этим трем схемам. Разыгрывание возможных значений показателя эффективности проводилось с помощью схемы Монте-Карло. На рисунке 1 для одного из вариантов расчета представлены гистограммы распределения показателя эффективности для каждого из трех портфелей, сформированных согласно схеме Марковица (серый цвет, левая гистограмма), VaR-схемы (серый цвет, правая гистограмма) и новой схемы, основанной на вероятностях приоритета (черный цвет).

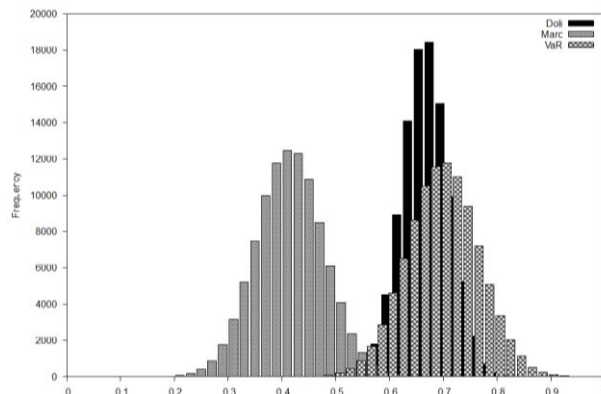


Рис. 1. Гистограммы распределения показателя эффективности портфелей, рассчитанные с помощью трёх схем, для портфелей из десяти инвестиционных проектов со слабой положительной ковариационной зависимостью и для доверительной вероятности 0.80.

Серия численных расчетов показала, что если выполняется обычное на практике условие – объекты с большим ожидаемым значением показателя эффективности имеют и большее значение неопределенности для возможных значений показателя эффективности, то эффективнее схема, основанная на вероятностях приоритета, в иных случаях эффективнее VaR - схема.

Список литературы

1. Markowitz H.M. Mean Variance Analysis in Portfolio Choice and Capital Markets: Basil, Blackwell, 1990.
2. Шарп У.Ф., Александер Г.Дж., Бэйли Д.В. Инвестиции: Москва: Инфра-М, 1997.
3. Крянев А.В. Основы финансового анализа и портфельного инвестирования в рыночной экономике: Москва: МИФИ, 2001.
4. Крянев А.В., Лукин Г.В. О постановке и решении задач оптимизации инвестиционных портфелей: Москва: 2001.
5. Kryanev A.V., Pavlov Yu.G., Sliva D.E., Ulyanin Yu.A. Schemes for the formation of effective resource portfolios and areas of activity of organizations based on statistical forecasts. // J. Phys. 2019. Conf. Ser. 1205 012028.

В.В. КУЗЕНОВ^{1,2}, П.Д. БРОСИН¹

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

²ВНИИА им. Н.И. Духова, Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе математического моделирования физических процессов (с учетом теплофизических свойств неидеальной плазмы) в электроразрядных источниках ведется разработка научно-технических основ функционирования компактных источников излучения и импульсных струй плазмы на основе линейно-стабилизированного разряда и магнитоплазменного компрессора.

V.V. KUZENOV^{1,2}, P.D. BROSIN¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

MATHEMATICAL MODEL OF PHYSICAL PROCESSES IN ELECTRIC DISCHARGE SYSTEMS FOR THE CREATION OF COMPACT RADIATION SOURCES

On the basis of mathematical modeling of physical processes (taking into account the thermophysical properties of nonideal plasma) in electric discharge sources, the development of scientific and technical foundations of the functioning of compact radiation sources and pulsed plasma jets based on a linearly stabilized discharge and a magnetoplasma compressor is carried out.

Наиболее перспективным направлением создания мощных источников излучения с омическим нагревом, удовлетворяющих требованиям многих практических и научных приложений, является использование открытых поверхностных сильнотоковых излучающих разрядов в газах. В эту группу входят разряды, плазменные образования которых формируются над цилиндрической или плоской поверхностью неразрушаемого диэлектрика, которая является не только плазмообразующим веществом, но и в ряде случаев (например, линейно-стабилизированный поверхностный разряд в плотных газах) выполняет функцию необходимого конструктивного элемента, ответственного за инициирование разряда.

Улучшение физико-технических характеристик компактных источников излучения и импульсных струй плазмы является объектом исследования для ученых в течение последнего десятилетия. Междисциплинарность исследования заключается в комплексном исследовании физических процессов в плазме разряда на основе теоретических моделей и методик численного эксперимента с применением известных экспериментальных данных, анализе и прогнозировании развития соответствующей техники и технологий [1-10].

Предпосылки эффективного использования схем с мощными источниками излучения обусловлены успехами экспериментов; теоретические и расчетные исследования базируются на весьма упрощенных методиках. Поэтому необходимы новые, более детальные физические модели и многоуровневые вычислительные модели, в т.ч. развитие существующих моделей учитывающих пространственную структуру струй, реальные уравнения состояния, теплообмена излучением и другие радиационно-плазодинамические процессы. Главная особенность данной работы заключается в возможности создания на основе выполненных исследований экспериментальных образцов портативных источников излучения и импульсных струй плазмы с рекордными характеристиками для использования для объектов атомной энергетики, повышение эффективности добычи углеводородного сырья и других сфер применения [8-15].

Список литературы

1. Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A. // Fusion Science and Technology. 2003. V. 43. № 1Т. P. 304–308.
2. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Journal of Phys.: Conf. Series. 2017. V. 830. P. 012124.
3. Кузенов В.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2016. Т. 7, № 4. С. 342–346.
4. Ryzhkov S.V. // Fusion Science and Technology. 2005. V. 47. № 2Т. P. 342–344.
5. Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. // ZAMP. 2019. V. 70. P. 46.
6. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 830. P. 012049.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Journal of Phys.: Conf. Series. 2017. V. 815. P. 012024.
8. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Shumaev V. V. // Problems of Atomic Science and Technology. 2015. No. 1 (95). P. 97-99.
9. Клименко Г.К., Кузенов В.В., Ляпин А.А., Рыжков С.В. Учебник: Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 264 с.
10. Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. Alternative Fusion Fuels and Systems. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. 200 p.
11. Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., et al. // Plasma Physics Reports. 2012. V. 38. P. 1025-1031.
12. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Physics of Plasmas. 2019. V. 26. P. 092704.
13. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Gavrilova A.Yu., Skorokhod E.P. // High Temperature Material Processes. 2014. V. 18. P. 119-130.
14. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Radiation-hydrodynamic modeling of the contact boundary of the plasma target placed in an external magnetic field // Applied Physics. 2014. № 3. P. 26-30.
15. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Russian J. Nonlinear Dynamics. 2019. V. 15, 4. P. 543-550.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЛЬНИКОВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАОСА В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ С НАСЫЩЕНИЕМ

Рассмотрена возмущенная модель для описания распространения оптических импульсов в нелинейной среде с насыщением. Для этого уравнения в переменных бегущей волны получены условия на управляющие параметры, при которых в системе может реализоваться гетероклинический или гомоклинический хаос. Предложен вариант контроля возможного хаоса.

S. F. LAVROVA, N. A. KUDRYASHOV
 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

APPLICATION OF MELNIKOV'S METHOD FOR EVALUATION OF CHAOS IN A NONLINEAR SATURABLE MEDIUM

A perturbed model describing the propagation of optical pulses in a nonlinear medium with saturation is considered. Conditions on the control parameters under which heteroclinic or homoclinic chaos is realized in the system are obtained using Melnikov method. The method to control the possible chaos is proposed.

Вопрос распространения оптических импульсов в нелинейной среде привлекает к себе внимание в течение многих лет из-за возможности применения в области систем оптической связи. Описание распространения солитонов обычно основывается на анализе нелинейного уравнения Шрёдингера, учитывающего кубическую нелинейность. Однако в ряде случаев поведения нелинейного отклика среды является более сложной функцией интенсивности света. Рассмотрим устойчивость к малым периодическим возмущениям одной известной модели нелинейного насыщения при распространении импульсов в оптическом волокне [1]

$$iq_t + q_{xx} + \alpha|q|^2q - m\left(q - \frac{q}{(1+\alpha|q|^2)^p}\right) = F\epsilon e^{i(kx+\omega t)} \cos(\Omega(x - C_0t)).(1)$$

где $q(x, t)$ комплекснозначная функция, соответствующая интенсивности света, а α, m, a, p - параметры среды.

Редукция уравнения (2) к переменным бегущей волны имеет следующий вид при $\beta = k^2 - \omega - m$

$$y_z = v, v_z = -\beta y - \alpha y^3 - \frac{my}{(1+ay^2)^p} + F\epsilon \cos\Omega z.(3)$$

С помощью метода Мельникова в работе показано, что необходимое условие возникновения гомоклинического и гетероклинического хаоса при наличии у системы (3) гомоклинических или гетероклинических орбит выполняется вне зависимости от параметров внешней силы. Для подавления хаоса системе (3) можно представить затухание в виде $-kv$

$$y_z = v, v_z = -\beta y - \alpha y^3 - \frac{my}{(1+ay^2)^p} + F\epsilon \cos\Omega z - kv.(4)$$

Зависимость критического значения $\frac{F}{\text{gamma}_c}$ возникновения гомоклинического хаоса в системе (4) в от частоты возмущающей силы Ω представлено на рис. 1. При значениях $\frac{F}{\text{gamma}}$ под кривой в системе выполняется необходимое условие возникновения гомоклинического хаоса.

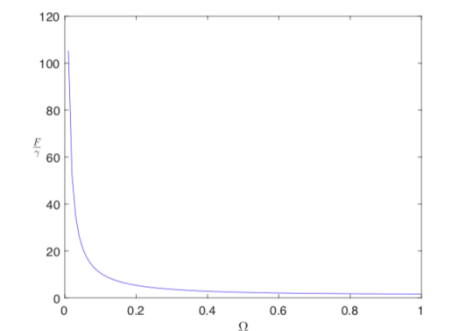


Рис. 1. Зависимость критического значения $\frac{F}{\text{gamma}_c}$ возникновения гомоклинического хаоса в (4) при $a = 10, m = -1, \beta = -2, \alpha = 1, p = 2, F = 0.2$

Список литературы

1. Krolikowski W., Luther-Davies B. // Opt. Lett. 1992. Vol. 17, № 20. P. 1414–1416.

З.Д. ЛИВЕНЕЦ¹, А.Ю. ЛУГОВСКИЙ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Москва, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В АККРЕЦИОННЫХ ЗВЕЗДНЫХ ДИСКАХ

Данная работа посвящена изучению свойств астрофизических объектов, а именно исследованию процессов развития крупномасштабной турбулентности в аккреционных звездных дисках. Подобная деятельность мотивирована необходимостью объяснения природы механизмов, которые ведут к перераспределению углового момента в диске и последующей аккреции вещества на центральное гравитирующее тело. Так, проведенное полное трехмерное моделирование процессов развития неустойчивости в изначально стационарном диске позволяет сделать выводы об эффективности перераспределения углового момента крупномасштабными вихревыми структурами.

Z.D. LIVENETS¹, A.YU. LUGOVSKY²

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

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

EVOLUTION AND FORMATION OF LARGE-SCALE VORTEX STRUCTURES IN ACCRETION STELLAR DISKS

This paper is devoted to the study of the properties of astrophysical objects, namely, the study of the processes of development of large-scale turbulence in accretion stellar disks. Such activity is motivated by the need to explain the nature of the mechanisms that lead to the redistribution of angular momentum in the disk and the subsequent accretion of matter to the central gravitating body. Thus, the complete three-dimensional modeling of the processes of instability development in an initially stationary disk allows us to draw conclusions about the efficiency of the redistribution of angular momentum by large-scale vortex structures.

Данная работа посвящена изучению аккреционных дисков. Подобные объекты являются мощными источниками энергии в нашей вселенной и формируются, когда газ с большим угловым моментом захватывается гравитационным полем какого-то тела. Происходящие в аккреционных дисках процессы могут обеспечивать эффективную трансформацию потенциальной энергии гравитационного взаимодействия в тепловое излучение.

В газовом облаке вещество, как правило, движется по замкнутой кеплеровской орбите, так как сила тяготения, приложенная к конечному объему вещества, уравнивается центробежной силой. Для интенсивного падения вещества на центральный объект и возникновения излучения при его торможении необходим механизм, который может обеспечить перераспределение углового момента в объеме аккреционного диска, поэтому основные усилия ученых направлены именно на обнаружение подобных процессов.

Предложенные на сегодняшний день механизмы, такие как турбулентная вязкость [1] и магниторотационная неустойчивость имеют ряд недостатков, поэтому в данной работе используется другой подход, в рамках которого перераспределение углового момента происходит благодаря движению вихревых структур, возникающих в результате развития крупномасштабной турбулентности в сдвиговом течении вещества диска [2]. Как было сказано ранее, вещество газового облака обладает значительным угловым моментом, однако анализ уравнения Эйлера с учетом внешнего гравитационного поля показывает, что стационарные конфигурации аккреционного диска могут существовать только при определенном распределении угловой скорости, убывающей с радиусом по степенному закону [3]. Этот факт говорит о сдвиговом характере течения вещества в диске.

Основные результаты о возникновении и эволюции крупномасштабной турбулентности в плоскопараллельном сдвиговом течении, между цилиндрами и в астрофизических условиях изложены в книге [4]. В ней показано, что появление крупномасштабных вихревых структур приводит к перераспределению углового момента в диске и последующей аккреции вещества, однако соответствующее моделирование было выполнено в рамках двумерного приближения, поэтому текущее исследование ставит своей целью проведение полного трехмерного расчета для подтверждения или опровержения гипотезы об эффективности переноса углового момента в диске крупномасштабными вихревыми структурами. Результаты изучения подобного механизма представлены в соответствующем докладе.

Список литературы

1. Шакура Н.И. Дискковая модель аккреции газа релятивистской звездой в тесной двойной системе // *Астрономический Журнал*. 1972. Т. 49. С. 921-929.
2. Belotserkovskii O.M., Chechetkin V.M., Fortova S.V., Oparin A.M., Popov Yu.P., Lugovsky A.Yu., Mukhin S.I. The turbulence in free shear flows and in accretion discs // *Astronomical & Astrophysical Transactions: The Journal of the Eurasian Astronomical Society*. 2006. V. 25, № 5&6. P. 419 – 434. <https://doi.org/10.1080/10556790601165676>
3. Абакумов М.В., Мухин С.И., Попов Ю.П., Четчин В.М. Исследование равновесных конфигураций газового облака вблизи гравитирующего центра // *Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН*. 1995. №33.
4. Белоцерковский О.М., Опарин А.М., Четчин В.М. Турбулентность: новые подходы. М.: Наука, 2006.

С.Ю. МИСЮРИН^{1,2}, Г.В. КРЕЙНИН², Н.Ю. НОСОВА²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Работа посвящена разработке метода оптимизационного синтеза нелинейных динамических роботизированных приводных комплексов с учетом влияния на процесс помех различного типа, в первую очередь, сил трения. В качестве объектов исследований берутся позиционные роботизированные системы с приводами различной физической природы. Системы этого типа наиболее чувствительны к точности реализации процесса вследствие заметного влияния сил трения, а также возмущений других видов. Рассматривались системы с гидравлическим и пневматическим двигателями. Последнему типу двигателя уделялось основное внимание, поскольку неточность таких систем особенно высока. Исследования проводились в безразмерной форме, переход к которым осуществляется на основе теории аналогичности [1-3]. В качестве модели трения используется модель Карноппа [4, 5-6].

S.YU. MISYURIN^{1,2}, G.V. KREININ², N.YU. NOSOVA²

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

²BlagonravovMechanical Engineering Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

RATIONALIZATION OF MATHEMATICAL MODELS OF TECHNICAL SYSTEMS FOR THE OPTIMIZATION PROBLEM

The work is devoted to the development of a method for optimizing the synthesis of nonlinear dynamic robotic drive systems, taking into account the influence of various types of interference on the process, primarily friction forces. Positional robotic systems with actuators of various physical natures are taken as objects of research. Systems of this type are most sensitive to the accuracy of the implementation of the process due to the noticeable influence of friction forces, as well as disturbances of other types. Systems with hydraulic and pneumatic actuators were considered. The latter type of actuator has been the focus of attention, since the inaccuracy of such systems is especially high. The studies were carried out in a dimensionless form, the transition to which is carried out on the basis of the theory of similarity [1-3]. The Karnopp model is used as a friction model [4, 5-6].

Технические системы с гидравлическими и пневматическими поршневыми приводами широко применяются в различных областях промышленности. И те, и другие отличаются высокими значениями удельной мощности. Первые используются в строительных машинах, машинах для испытания материалов, в активных подвесках транспортных машин, шахтном оборудовании, тренажерах, бумагоделательном оборудовании, кораблестроении, робототехнике, производстве кабелей и многих других областях, где требуются большие рабочие усилия и разнообразные законы движения. Основная область применения вторых – оборудование пищевой, фармацевтической, электронной, робототехнической, машиностроительной и некоторых других областей промышленности. Однако общим для гидравлических и пневматических приводных систем является наличие скользящего в уплотнениях поршня, со всеми присущими ему особенностями. Одной из них является фактор трения, существенно влияющий на динамику и точность функционирования приводной системы. Это влияние проявляется в большей степени в пневматических системах, главным образом из-за высокой сжимаемости рабочего тела (воздуха).

После составления динамических систем с учетом всех основных сил влияющих на работу позиционной системы необходимо решить задачу многокритериальной (многопараметрической) оптимизации для определения тех параметров и режимов работы при которых будут достигнуты определенные показатели движения. Оптимизация ведется в безразмерных параметрах.

Как показано в работе [4] в задачах оптимизации целесообразно использовать модель трения Карноппа [5]. Эта модель достаточно хорошо отражает основные физические процессы трения, включая сухое и вязкое трение:

Основной отрицательный момент, возникающий в приводных комплексах в связи с наличием трения это эффект «stik-slip», залипание привода на малых скоростях в начальный момент движения и остановки. Это сказывается, в первую очередь, на точности позиционирования привода. Путем многокритериальной оптимизации параметров привода и режимов управления удастся свести это негативное влияние к минимуму.

Список литературы

1. Misyurin S.Y., Kreinin G.V., Nosova N.Y. // Rus. J. Nonlin. Dyn. 2019. V. 15, № 3. P. 213–220.
2. Misyurin S., Kreinin G., Nelyubin A., Nosova N. // Mathematics. 2021. V. 9, № 22. P. 2854.
3. Misyurin S.Yu., Kreinin G.V., Nelubin A.P., Nosova N.Yu. // J. Phys. Conf. Series. 2020. V. 1439. № 1. P. 012016.
4. Misyurin S.Y., Kreinin G.V., Nosova N.Y., Nelyubin A.P. // Advan. Intel.Sys.& Computing. 2021. V. 1310. P. 309–319.
5. Karnopp D. J. Dyn. Syst. Meas. Contr. 1985. V. 107. № 1. P. 100–103.
6. Alleyne A., Liu R. // Control Eng. Pract. 2000. V. 8. № 12. P. 1347–1356.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ДИАГРАММ ВОРОНОГО ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ

Динамическая балансировка нагрузки – это процесс перераспределения вычислительной нагрузки между вычислительными ресурсами. Балансировка нагрузки имеет очень высокое значение при моделировании процессов с существенным дисбалансом нагрузки. К примеру, при моделировании многомасштабных задач с использованием адаптивных сеток. Один из широко известных методов балансировки нагрузки основан на использовании диаграмм Вороного. В данной работе предлагается усовершенствование алгоритма, в котором используются взвешенные диаграммы Вороного.

R.V. MURATOV¹, P.N. RYABOV¹¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

USE OF WEIGHTED VORONOI DIAGRAMS FOR PARALLEL SIMULATING OF SHEAR BANDS LOCALIZATION

Dynamic load balancing is the process of redistributing of workload among computing resources. This algorithm is very important in simulating of processes with a significant load imbalance. For example, in simulating of multiscale problems using adaptive mesh refinement. One of load balancing methods is the use of Voronoi diagrams. This paper proposes an improvement to the algorithm that uses weighted Voronoi diagrams.

За основу алгоритма балансировки нагрузки выбран метод декомпозиции, используемый в работе Егоровой [1]. Метод позволяет построить оптимальную декомпозицию области с помощью диаграммы Вороного, а затем подстраивать её под изменяющуюся вычислительную нагрузку в ходе расчета. Идея метода достаточно проста: на каждом шаге балансировки нагрузки требуется перемещать центры ячеек Вороного против градиента нагрузки. В результате балансировки ячейки Вороного сгущаются в области с максимальной нагрузкой.

Данный метод показал свою эффективность в расчетах с использованием методики сглаженных частиц, но оказался не так эффективен при декомпозиции адаптивных сеток. Недостатки алгоритма проявляются в задачах с существенным дисбалансом нагрузки. Для учета этого фактора в статье используются взвешенные диаграммы.

На рисунке 1 показана адаптивная сетка, полученная при численном моделировании сдвиговых деформаций в пластичном материале [2]. При высокоскоростном сдвиге в образце формируются множественные полосы адиабатического сдвига (локализуется деформация). Задача является многомасштабной, так как ширина полос существенно меньше размеров образца. Сеточная адаптация используется для отслеживания полос сдвига.

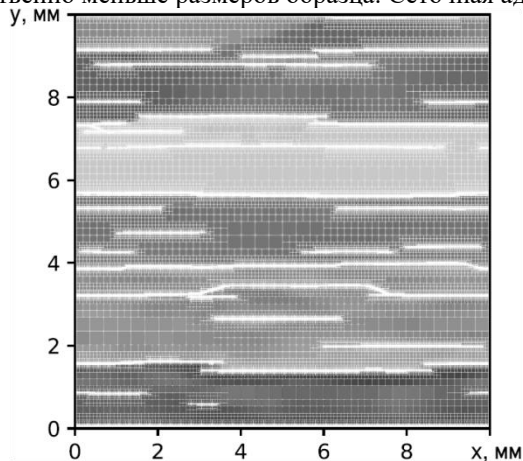


Рис. 1. Адаптивная сетка с высоким разрешением в областях локализации деформаций.

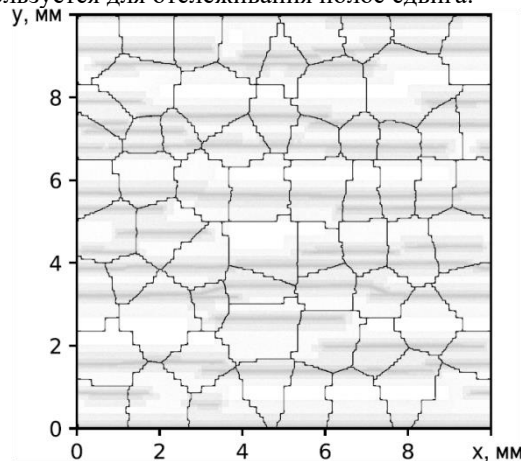


Рис. 2. Оптимальная декомпозиция сетки с использованием взвешенной диаграммы Вороного.

Результаты моделирования различных задач показали преимущества использования взвешенных диаграмм Вороного для декомпозиции областей при параллельном моделировании. В частности, использование взвешенных диаграмм позволяет существенно ускорить проведение расчетов, связанных с локализацией деформаций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, грант №21-71-00102.

Список литературы

1. Egorova M.S., Dyachkov S.A., Parshikov A.N. and Zhakhovsky V. // Comput. Phys. Commun. 2019. V. 234. PP. 112-125.
2. Muratov R.V., Kudryashov N.A., Ryabov P. N. // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2021. V. 101.

В.В. НАЗАРОВ¹

¹Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРРОЗИИ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПЛОСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ И ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Водородная коррозия при высокой температуре служит одной из возможных причин отказов и замены конструктивных элементов оборудования из углеродистых и низколегированных сталей на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах. Одним из конструктивных элементов, подвергающихся воздействию водородной коррозии, может быть элемент цилиндрической стальной трубы с окружным сварным швом. Под водородной коррозией понимают химическое взаимодействие диффундирующего водорода с карбидами стали, в результате которого образуется газообразный метан. На границе соприкосновения с твердым телом молекула водорода адсорбируется на атомы, которые затем диффундируют в сталь. Так как молекула метана относительно крупная, то она не способна к диффузии из твердого тела, что приводит к увеличению концентрации, и соответственно, давления метана. На границах зерен и включениях под воздействием давления метана образуются и растут микропоры. По мере своего роста микропоры сливаются со своими соседями до тех пор, пока не образуют трещины, которые впоследствии могут привести к межкристаллитному разрушению. В данной работе приведен алгоритм вычисления давления метана в микропорах для элемента цилиндрической стальной трубы.

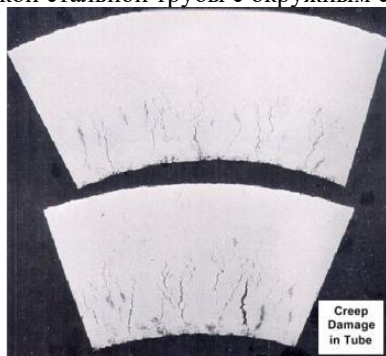
V. NAZAROV¹

¹Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

MATHEMATICAL MODEL OF CORROSION AT AXISYMMETRIC PLANE DEFORMATION OF A CYLINDRICAL STEEL TUBE UNDER THE INFLUENCE OF INTERNAL HYDROGEN-CONTAINING MEDIUM PRESSURE AND HIGH TEMPERATURE

Hydrogen corrosion at high temperatures is one of the possible causes of failures and replacement of structural elements of equipment made of carbon and low alloy steels in oil refineries and petrochemical plants. One of the structural elements exposed to hydrogen corrosion can be a cylindrical steel tube element with a circumferential weld. Hydrogen corrosion is understood as the chemical interaction of diffusing hydrogen with steel carbides, as a result of which methane gas is formed. At the interface with a solid, a hydrogen molecule adsorbs onto atoms, which then diffuse into the steel. Since the methane molecule is relatively large, it is not capable of diffusion from a solid, which leads to an increase in the concentration and, accordingly, the pressure of methane. Micropores form and grow at grain boundaries and inclusions under the influence of methane pressure. As they grow, micropores merge with their neighbors until they form cracks, which can subsequently lead to intergranular fracture. This paper presents an algorithm for calculating the pressure of methane in micropores for a element of the cylindrical steel tube.

Предложена модель, описывающая процесс водородной коррозии элемента цилиндрической трубы под внутренним давлением водородосодержащей среды и высокой температуры. На нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах водородная коррозия может приводить к отказу и замене конструктивных элементов оборудования, изготовленных из углеродистых и низколегированных сталей. Одними из таких конструктивных элементов могут быть элементы цилиндрической стальной трубы с окружным сварным швом,



Поперечный срез разрушенного элемента цилиндрической стальной трубы с радиальными метановыми трещинами

который из-за более высокого содержания микропор, чем в основном материале цилиндрической трубы, подвержен воздействию водородной коррозии. При отсутствии водородной коррозии причиной разрушения служит максимальное окружное напряжение, при этом трещина одна (редко две), которая образуется на внешнем граничном радиусе. При наличии водородной коррозии механизм разрушения другой, при котором главная роль отводится величине давления продуктов химического взаимодействия (метана) в микропорах обезуглепроживаемой стали, при этом радиальных трещин много, которые образуются в окрестности внутреннего граничного радиуса и затем продвигаются в направлении внешнего граничного радиуса.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 20-08-00387).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Выполнен анализ продольных напряжений, возникающих в поперечном сечении при нагреве боковой поверхности стержня. При расчете учитывалась неравномерность распределения температуры по ширине. Анализ представленных результатов свидетельствует, что неравномерное распределение температуры по ширине сечения является причиной формирования зон растягивающих и сжимающих напряжений.

A.P. PILIPCHUK, O.G. DEVOINO
Belarusian National Technical University-Minsk

SIMULATION OF THERMOELASTIC STRESSES DURING LASER PROCESSING WITH CONSIDERATION OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION

The analysis of longitudinal stresses arising in the cross section during heating of the lateral surface of the rod is carried out. The calculation took into account the uneven distribution of temperature over the width. An analysis of the presented results indicates that the uneven distribution of temperature over the width of the section is the reason for the formation of zones of tensile and compressive stresses.

При лазерной обработке в результате неравномерного нагрева и охлаждения с высокой скоростью, фазовых и структурных превращений возникают термические напряжения. Данные напряжения в значительной степени влияют на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя и являются причиной трещинообразования при лазерной обработке. На рисунке 1 представлена фотография трещины в образце полученном селективным лазерным спеканием из сплава ПГ-СР2 с использованием CO_2 – лазера «Комета». На основе анализа характера расположения трещин сделан вывод об определяющей роли продольных напряжений, действующих вдоль траектории источника и необходимости прогнозирования напряженного состояния.



Рис. 1. Трещина в образце из сплава ПГ-СР2

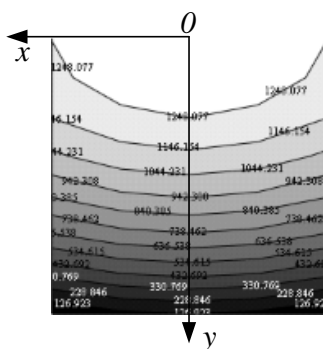


Рис. 2. Модельное распределение температуры по сечению образца

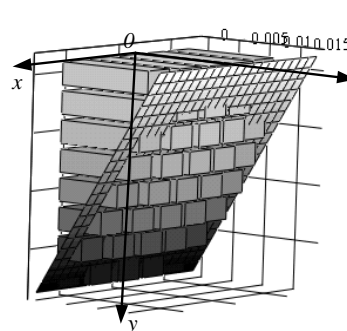


Рис. 3. Температурные деформации и положение сечения в результате нагрева

Механизм формирования напряженного состояния при воздействии поверхностного высококонцентрированного источника энергии рассмотрен в работах Г.А. Николаева, Н.О. Окерблома, И.П. Трочуна, А.Г. Григорьянца, В.С. Майорова и других авторов. В настоящей работе выполнен расчет термоупругих напряжений на основе использования решения И.А. Биргера [1]. Решение основано на гипотезе плоских сечений: точки плоскости поперечного сечения после деформации лежат в одной плоскости, что позволяет использовать положение плоскости сечения в качестве показателя деформирования. Формула применима и для тел переменного сечения и с переменными упруго-геометрическими характеристиками сечения. Также на основе применения данной формулы возможно определение напряжений в случае, когда появляются пластические деформации (метод переменных параметров упругости).

Выполнен расчет термических упругих напряжений для призматического стержня сечением 5*8 мм из стали 40Х боковая поверхность которого нагревается лазерным лучом. На рисунке 2 представлено модельное распределение температуры в поперечном сечении стержня, которое характеризуется неравномерностью по ширине. Так как действительные деформации каждого элемента зависят от деформаций всех других элементов, то с учетом гипотезы плоских сечений результирующая деформация изобразится в виде плоскости. Полученные значения деформаций позволяют определить напряжения. Результаты расчета деформаций на этапе нагрева представлены на рисунке 3. Угол поворота сечения в данном случае составил $0,136^\circ$.

Список литературы

1. Биргер И. А. Неравномерно нагретые стержни с переменными параметрами упругости. — В кн.: Расчеты на прочность. Вып. 7. М., Машгиз, 1961, с. 76—109.

В.М. РЕЧКИН, Ю.А. ВЯТКИН, М.А. ПУХОВ, Е.С. МЕДВЕДЕВ
Саровский физико-технический институт, Саров, Россия
РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДЕРЖАТЕЛЯ КАНТОВАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА АЭС

В работе выполнен численный расчет напряженно-деформированного состояния конструкции держателя кантователя с помощью отечественного пакета программ ЛОГОС. Рассмотрено как отдельное, так и совместное действие транспортных перегрузок на конструкцию.

V.M. RECHKIN, Y.A. VYATKIN, M.A. PUKHOV, E.S. MEDVEDEV
Sarov Institute of Physics and Technology, Sarov, Russia
RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

NUMERICAL STUDIES OF THE PARAMETERS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE DESIGN OF THE TILTER HOLDER UNDER CONDITIONS OF USE DURING OPERATION AT NUCLEAR POWER PLANTS

Numerical calculation of the stress-strain state of the tilting arm structure using the domestic LOGOS software package has been carried out in this work. Both separate and combined effects of transport overloads on the structure have been considered.

В настоящее время наиболее важными и актуальными вопросами, возникающими при эксплуатации современных атомных электростанций (АЭС), наряду с технологичностью и экономичностью, являются вопросы безопасности и безотказности работы ответственных узлов и агрегатов. Сегодня проектирование АЭС не представляется без применения современных численных методик, позволяющих провести имитационное моделирование состояния конструкции при многофакторных воздействиях различной природы и оптимизировать исследуемую конструкцию для выполнения поставленных задач.

Методы численного моделирования позволяют определить напряженно-деформированное состояние (НДС) в любой области конструкции в любой момент времени и представить графическом виде результаты действия нагрузок, что зачастую является невозможным добиться экспериментальными методами [1–2].

Отечественный пакет программ ЛОГОС, активно разрабатываемый сегодня РФЯЦ ВНИИЭФ, является конкурентоспособной инновационной Российской разработкой и претендует на государственную премию. Он уже используется в промышленности, и с его помощью было введено в эксплуатацию множество изделий атомной отрасли.

По действующему международному договору, строительству первой АЭС «Аккую» в Турции, РФЯЦ ВНИИЭФ занимается разработкой эксплуатационного оборудования для обращения с ТУК, а именно держателя кантователя.

Держатель является частью эксплуатационного оборудования, используемого для обращения с кантователем. Кантователь используется для технологических работ с наружной и внутренней крышкой ТУК. При перевозке держатель кантователя, закрепляется на платформе автопоезда четырьмя стропами. Данная конструкция обеспечивает безопасность перевозки ЯТ и ЯОТ.

Для исследования прочности держателя с установленным кантователем, был выполнен численный расчет НДС конструкции при действии транспортных перегрузок, средствами пакета программ ЛОГОС, который разработан РФЯЦ-ВНИИЭФ [3–7].

Список литературы

1. Емельянов В.Н. Численные методы введение в теорию разностных схем, 2018 г.
2. Рейзлин В.И. 2018 г. Математическое моделирование.
3. НП-053-16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов.
4. НРП-93. Нормы расчета на прочность транспортных упаковочных комплектов для перевозки ядерных делящихся материалов.
5. НП-105-18. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже.
6. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
7. В.А. Добровольский. Детали машин. Издание седьмое. Киев, Государственное издательство технической литературы УССР, 1954 г.

И.Д. РУБЦОВА¹, Л.В. ВЛАДИМИРОВА¹, А.Ю. ЖДАНОВА¹, Н.С. ЕДАМЕНКО¹,
¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА С МУТАЦИЕЙ

Задача оптимизации динамики пучка в линейном ускорителе сводится к отысканию глобального минимума функционала качества в многомерном пространстве параметров. Для решения задачи применяется генетический стохастический алгоритм, основанный на моделировании многомерного нормального распределения с адаптацией ковариационной матрицы, при этом вычисления матрицы не требуется. Введена модификация алгоритма, связанная с делением каждого поколения на группы, для которых используются различные среднеквадратические отклонения. Это позволяет избежать быстрого стягивания выборки в точку локального экстремума. Проведенная оптимизация существенно улучшила характеристики пучка электронов.

I.D. RUBTSOVA¹, L.V. VLADIMIROVA¹, A.Y. ZHDANOVA¹, N.S. EDAMENKO¹
¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

BEAM DYNAMICS OPTIMIZATION IN THE ACCELERATOR USING THE GENETIC ALGORITHM WITH MUTATION

The problem of beam dynamics optimization in a linear accelerator is reduced to finding the global minimum of the quality functional in a multidimensional parameter space. To solve the problem, a genetic stochastic algorithm is used, based on modeling a multivariate normal distribution with adaptation of the covariance matrix, while the calculation of the matrix is not required. A modification of the algorithm has been introduced consisting in dividing each generation into several groups of trial points distributed with different standard deviations. This makes it possible to avoid the rapid contraction of the sample to a local extremum point. The optimization performed significantly improved the characteristics of electron beam.

Задача оптимизации динамики пучка сводится к отысканию глобального минимума функционала качества $K(u)$, где u – вектор управляющих параметров. Для решения этой сложной многоэкстремальной задачи применяется генетический стохастический алгоритм. Алгоритм основан на моделировании многомерного нормального распределения и обеспечивает адаптацию ковариационной матрицы [1].

Общая идея предлагаемого алгоритма отыскания глобального минимума состоит в моделировании последовательности поколений пробных точек, сгущающихся в окрестности точки минимума. Нулевое поколение моделируется при использовании равномерного распределения, последующие поколения – нормального. Положения пробных точек на каждом этапе поиска рассчитываются через положения «перспективных» точек предыдущего поколения, поэтому вычисления самой ковариационной матрицы не требуется. Введена следующая модификация: каждое поколение делится на группы, для которых используются различные значения полуосей эллипсоида рассеивания. Это позволяет избежать быстрого стягивания выборки в точку и получения локального экстремума вместо глобального.

Проведенная оптимизация позволила существенно улучшить характеристики пучка. Так, относительный разброс по энергиям на выходе ускорителя снизился с 0.76 до 0.26, разброс фаз – с 2.33 до 1.21 радиан. Значение критерия качества уменьшилось с 12.986 до 1.035. На рис. 1 представлены графики изменения приведенной энергии частиц γ в зависимости от приведенной координаты ξ до оптимизации (слева) и после оптимизации (справа). Жирной пунктирной линией показан график $\gamma(\xi)$ для равновесной частицы.

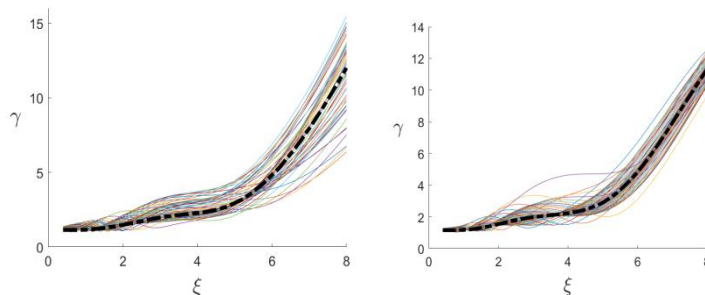


Рис. 1. График изменения приведенных энергий модельных частиц вдоль структуры до (слева) и после (справа) оптимизации

Список литературы

1. Ermakov S.M., Semenchikov D.N. Genetic global optimization algorithms// Communications in Statistics, Part B: Simulation and Computation, 2019, <https://doi.org/10.1080/03610918.2019.1672739>.

В.М.РУДЕНКО, Е.В.КОРОТКОВ

ФИЦ Фундаментальные основы биотехнологии РАН, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА MAHDS ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОМОТОРОВ В ГЕНОМЕ ПЕРЦА

Метод MAHDS был применен для поиска потенциальных промоторных последовательностей (ППП) в геноме перца. Было обнаружено более 850 тысяч ППП, присутствие которых может говорить о наличии в геноме перца неаннотированных генов и мобильных элементов.

V.M.RUDENKO, E.V.KOROTKOV

Center of Bioengineering Research Center of Biotechnology RAS, Russia

APPLICATION OF THE MAHDS METHOD TO DETECT PROMOTERS IN THE PEPPER GENOME

MAHDS method was applied to search for potential promoter sequences (PPS) in the *Capsicum annuum* genome. More than 850 thousand PPS were found. Such a big number of PPS may indicate the presence of unannotated genes and mobile elements in the *Capsicum annuum* genome.

В качестве исходных данных были выбраны 25 тысяч промоторных областей, расположенных от -499 до +100 позиции от начала генов. Они классифицировались, в результате чего было определено 20 классов промоторных областей, которые включают в себя 75% исходного множества. Были построены профили классов, которые также изучались на наличие консервативных позиций. Было отмечено, что в позициях, близких к сайту старта транскрипции и непосредственно за ним наблюдаются экстремально большие значения отклонений частот динуклеотидов по сравнению со случайным. Используя метод MAHDS [1] и профили классов осуществлялся поиск ППП. Всего в геноме перца удалось обнаружить более 850 тысяч ППП. Найденное значение превышает число аннотированных генов в 30 раз. Причиной такого большого числа обнаруженных ППП может служить наличие неаннотированных генов, а также мобильных элементов в геноме. Этот факт подтверждает тестирование найденных нами ППП программой поиска промоторов TSSFinder [2].

Список литературы

1. Korotkov E.V., Suvorova Y.M. et.al. // Genes 2021. Vol.12, 135.
2. De Medeiros Oliveira M., Bonadio I. et.al. // Brief. Bioinform. 2021. Vol.22.

НОРМАЛИЗАЦИЯ СУЩНОСТЕЙ В РУССКОЯЗЫЧНЫХ ТЕКСТАХ ИНТЕРНЕТ-ОТЗЫВАХ О ПРЕПАРАТАХ

В работе представлен способ приведения неформальных выражений в текстах отзывов о препаратах, называемых сущностями, к соответствующим по смыслу концептам из медицинского словаря для регуляторной деятельности MedDRA.

G.V. RYLKOV², A.G. SBOEV^{1,2}, R.B. RYBKA²¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia, ²National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia**NORMALIZATION OF ENTITIES IN THE RUSSIAN TEXTS OF INTERNET DRUG REVIEWS**

The paper presents a way to bring informal expressions in the texts of drug reviews, called entities, to the corresponding concepts from the medical dictionary for regulatory activity MedDRA.

Задача нормализации представляет собой перевод разговорного стиля изложения к стандартизованному виду. В текущей работе, решается задачи нормализации упоминаний фармацевтически-значимых сущностей: нежелательных реакций препаратов, симптомов заболеваний, из интернет отзывов о медикаментах, написанных на естественном языке, в стандарт медицинского словаря для регуляторной деятельности MedDRA (раздел Preferred terms, PT).

Для решения задачи мы реализовали метод из статьи [1]. В нашей реализации в качестве модели векторного представления упоминаний и концептов MedDRA была использована языковая модель RuBERT [2].

В настоящей работе были проведены эксперименты с разным представлением входных данных: с добавлением контекста (т.е. текста в пределах предложения) и без него. В последнем случае векторное представление для сущности формируется с учетом слов в предложении, в котором она была встречена. Также был проведен эксперимент, тестирующий способность модели отличать сущности, у которых есть концепт в словаре MedDRA, от сущностей, у которых данного концепта нет: последним присваивается метка «conceptless». Метки conceptless присутствуют исключительно в тестовой выборке этого эксперимента, и присваиваются, если ни одна из координат выходного вектора модели не выше порогового значения. Порог подбирался вручную, на основе значений косинусной близости векторов слов, не связанных по смыслу ни с одним термином PT MedDRA. Также был протестирован, основанный на правилах метод (ES), сопоставляющий побуквенно фразы и концепты из словаря, на тестировочном множестве с «conceptless». Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Эксперименты с влиянием контекста на работу метода, а также с добавлением в тестировочную выборку меток «conceptless» для оценки дифференциации сущностей с концептами и без них. Изначальные гиперпараметры моделей, такие как скорость обучения, размер батча и веса одинаковы.

метод	Есть ли контекст	Есть ли в тестировочной выборке conceptless	Точность F1-score
Метод на базе RuBERT	Нет	Нет	0,73
	Да	Нет	0,72
	Да	Да	0,68
	Нет	Да	0,69
ES	Нет	Да	0,66

Как видно из таблицы 1, добавление контекста в предложенный метод ухудшает результат на ~0.01. Добавление меток «conceptless» также ухудшает результат на 0.04-0.05, из чего следует вывод о том, что метод не может классифицировать сущности без концептов наравне с сущностями, обладающими концептами в словаре. Как видно из последних двух строчек, метод работает лучше основанного на правилах алгоритма поиска ES.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20246).

Список литературы

1. Kalyan K. S., Sangeetha S. Target concept guided medical concept normalization in noisy user-generated texts // Proceedings of Deep Learning Inside Out (DeeLIO): The First Workshop on Knowledge Extraction and Integration for Deep Learning Architectures. – 2020. – С. 64-73.
2. Kuratov, Y., Arkhipov, M. (2019). Adaptation of Deep Bidirectional Multilingual Transformers for Russian Language. arXiv preprint arXiv:1905.07213.

М.С. СКОРОХОДОВ, А.Г. СБОЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЗГЛЯДОУКАЗАНИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ РЕЧЕВЫХ КОМАНД РОБОТУ

Проведено исследование возможности применения методов глубокого обучения, для повышения эффективности решения задачи взглядоуказания. В работе представлен подготовленный размеченный набор данных изображений лиц с координатами направления взгляда на экране монитора. На его основе получено создано несколько моделей нейронных сетей.

M.S. SKOROKHODOV, A.G. SBOEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia
National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

ON THE POSSIBILITY OF USING THE GAZE DIRECTION TO REFINE SPEECH COMMANDS TO A ROBOT

The possibility of using deep learning methods to improve the efficiency of solving the problem of eye tracking is investigated. For these reasons, we prepared labeled data set of face images with the coordinates of the gaze direction on the monitor screen. Using this dataset several models of neural networks were created and estimated.

В настоящее время задача определения направления взгляда является актуальной для ряда приложений, в т.ч. исследований пользовательского поведения в интернете [1]. В данной области существует и продолжает развиваться ряд решений, основанных как на аппаратных, так и программных средствах. В этой работе предложены нейросетевые решения, пригодные для эффективного решения задачи взглядоуказания, и оценена их точность. Оценка проведена на основанном наборе данных, который состоит из кадров, полученных с вебкамеры, подключенной к компьютеру, и точек на экране монитора, выраженных в пикселях. Изображения дополнительно обработаны средствами библиотеки Mediapipe, для получения трехмерных координат сетки лица и глаз. Также были созданы отдельные изображения глаз для каждого оригинального изображения с вебкамеры.

Дополнительно был размечен открытый блок данных, предоставляемый авторами [1].

Таблица 1. Сводка собранных и открытых данных.

Источник	Количество участников	Количество кадров
Собранные данные	7	39200
Открытые данные	51	392256

Были подготовлены 6 моделей для определения взгляда методами глубокого обучения. Модели различаются по типу входных данных и топологии: Полносвязная сеть содержит 3 полносвязных слоя для обработки трехмерных сеток лица и глаз, Сверточная сеть помимо 3 полносвязных включает 2 сверточных слоя для обработки изображений глаз. Все модели имеют объединяющий слой, после которого следует выходной слой, который делится на 2 типа: отдельные координаты - для определения горизонтальной и вертикальной координаты обучаются 2 отдельные модели, совместные координаты - горизонтальная и вертикальная координаты, определяются одним выходным слоем модели.

Для оценки моделей на собранных и открытых данных рассчитывается среднее евклидово расстояние L2 между истинным и предсказанным направлениям взгляда в пикселях:

$$L2 = \frac{1}{n} \sqrt{(X_T - X_P)^2 + (Y_T - Y_P)^2}$$

Результаты обучения моделей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Оценка моделей.

Модель	Собранные данные		Открытые данные	
	Раздельные к.	Совместные к.	Раздельные к.	Совместные к.
Полносвязная сеть	188	204	199	212
Сверточная сеть	104	110	115	121

Обучение и оценка моделей показала, что применение методов глубокого обучения позволяет решить задачу взглядоуказания с минимальной ошибкой в 104 пикселя на собранных данных, при использовании модели со сверточными слоями.

Работа выполнена за счет средств субсидий на выполнение госзадания (приказ от 28.10.2021 г. №2754)

Список литературы

1. Papoutsaki, A., Sangkloy, P., Laskey, J., Daskalova, N., Huang, J., Hays, J.: Webgazer: Scalable webcam eye tracking using user interactions. In: Proceedings of the 25th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pp. 3839-3845, AAAI (2016).

А.В. ТЕТЕРЕВ¹, И.М. КОЗЛОВ¹, Л.В. РУДАК¹, П.А. МАНДРИК¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Разработана физико-математическая модель гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя работающего на гептане. Построенный на ее основании программный комплекс позволяет изменять геометрические параметры двигательной установки и моделировать различные режимы подачи топлива в камеру сгорания исследуемого двигателя. Проведены параметрические расчеты с диффузионным и объемным типом горения в двумерном и трехмерном приближениях. Обнаружены различные режимы обтекания модельного двигателя.

A.V. TETEREV¹, I.M. KOZLOV¹, L.V. RUDAK¹, P.A. MANDRIK¹

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

SIMULATION OF A HYPERSONIC RAMJET ENGINE

A physical and mathematical model of a hypersonic ramjet engine powered by heptane has been developed. The software package built on its basis allows changing the geometric parameters of the propulsion system and simulating various modes of fuel supply to the combustion chamber of the engine under study. Parametric calculations were carried out with diffusion and volumetric combustion in two-dimensional and three-dimensional approximations. Various modes of flow around a model engine are found.

Объектом исследования является модельная схема гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя, работа которого основана на сжатии сверхзвукового воздушного потока в конфузурной части канала, подаче топлива и его воспламенении в камере сгорания. Горючим веществом на первом этапе моделирования был выбран гептан C_7H_{16} , а в качестве окислителя естественно используется воздух.

На рисунке изображен разрез модельного гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Здесь 1 – воздухозаборник, представляющий собой конический конфузор с внешним радиусом R_1 углом схождения β_1 и внутренним радиусом R_2 , через который поступает воздух в камеру сгорания, 2 – цилиндрическая камера сгорания длиной h_2 , в которой осуществляется впрыск топлива, 3 – коническое сопло с углом раскрытия β_3 до выходного радиуса R_3 . Возможное местоположение области впрыска топлива помечено на рисунке штриховкой.

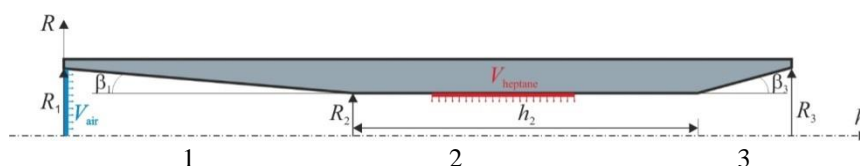


Рис. Схема модельного ГПВРД

Математическая модель, описывающая течение реагирующей газовой смеси в ударной трубе, представляет собой систему газодинамических уравнений, для замыкания которой необходимо задать термическое и калорическое уравнения состояния для каждой компоненты смеси в виде:

$$p_k = p_k(\rho Y_k, T) \text{ и } \varepsilon_k = \varepsilon_k(\rho Y_k, T).$$

Математическая модель химической кинетики представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений [1] с нелинейными коэффициентами относительно вектора массовых долей реагентов и температуры. Каждое уравнение системы является законом сохранения соответствующего компонента смеси, реагирующего по закону Аррениуса.

Расчеты показали, что до определенной скорости наблюдается режим обтекания модельного ГПВРД, названный нами «захлебыванием», заключающийся в постепенном нарастании давления внутри двигателя, скорость потока при этом постепенно снижается, что приводит практически к запиранью внутреннего воздушного потока и картина обтекания начинает напоминать обтекание цилиндра. Кроме того, было обнаружено, что при определенных изменениях входных параметров объемного горения оно переходит в диффузионное. В области, куда впрыскивается гептан, выгорает весь кислород и дальнейшее горение происходит в тонком поверхностном объеме смешения гептана с воздухом, т.е. возникает диффузионное горение, когда горение происходит одновременно с перемешиванием [1].

Список литературы

1. Бартльме Ф. Газодинамика горения: Пер. с нем. Москва: Энергоиздат, 1981, С. 280.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАЛЕОКЛИМАТА НА ОСНОВЕ СКВАЖИННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Проводится исследование существующих методов реконструкции температуры поверхности Земли по данным измерений температуры в скважине. На тестовых задачах показано, что эти методы не всегда могут предоставить корректную информацию об изменениях температуры в прошлом. Для решения этой проблемы предлагается использовать дополнительную информацию об изменениях климата из других природных источников.

S.A. TYUFLIN, O.V. NAGORNOV, T.I. BUKHAROVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SENSITIVITY OF VARIOUS PALEOCLIMATE RETRIEVAL METHODS BASED ON THE BOREHOLE TEMPERATURE MEASUREMENTS

The existing reconstruction methods of the past surface temperature of the Earth by data on the borehole temperature measurements are studied. Usage of the test problems allowed us to show that there are restrictions on the proper correlation of the determined past surface temperature and input test temperature. The additional information on the climate changes from the other natural sources significantly improves quality of reconstruction.

Для восстановления прошлых температур поверхности Земли используются данные различных косвенных источников изменения климата. Наиболее достоверными с точки зрения реконструкции прошлых температур являются данные по температурным измерениям в скважинах. Математическая постановка обратной задачи включает в себя уравнение теплопроводности, начальное и граничное условия и условие переопределения [1]. Граничными условиями являются стационарный геотермический тепловой поток Земли у основания и изменения температуры на поверхности. Условием переопределения является измеренный температурный профиль в скважине $\chi(z)$, z - вертикальная координата. Тогда нахождение температуры на поверхности в прошлом является решением одномерной обратной задачи для уравнения теплопроводности для скважины глубины H :

$$\begin{cases} T_t = a^2 T_{zz}, & 0 < t < t_f, \quad 0 < z < H, \\ T(0, t) = U_s + \mu(t), & 0 < t \leq t_f, \\ -k \cdot T_z(H, t) = q, & 0 < t \leq t_f, \\ T(z, 0) = U(z), & 0 \leq z \leq H, \\ T(z, t_f) = \chi(z), & 0 \leq z \leq H, \end{cases}$$

где a^2 – коэффициент температуропроводности, k – коэффициент теплопроводности, q – геотермический тепловой поток, $U(z)$ – стационарный профиль температуры, связанный с этим потоком. U_s – начальная температура на поверхности, которая характеризует среднюю температуру, которая была на поверхности в прошлом. $\mu(t)$ – изменения температуры на поверхности относительно ее начального значения U_s в момент времени $t=0$ ($\mu(0)=0$).

Наиболее часто используемыми методами восстановления прошлых температур являются: метод сингулярного разложения [1], метод инверсии функционального пространства [2] и метод регуляризации Тихонова [3]. Тестовые задачи показывают, что эти методы не всегда позволяют получить достоверную информацию об изменениях температуры на поверхности. В частности, показано, что в рамках погрешности измерений невозможно однозначно определить – были ли возмущения температурного профиля в скважине вызваны одним изменением температуры $\sim 1^\circ\text{C}$ на достаточно большом промежутке времени (~ 100 лет), или это были два других изменения температуры схожих по длительности и величине, на других интервалах времени. Таким образом, данные методы оказываются мало пригодными даже для установления Малого Ледникового Периода.

Для того, чтобы решить эту проблему, в работе предлагается использовать при реконструкции дополнительную информацию. Такая информация может быть получена из других косвенных источников изменения климата, таких как кольца деревьев, кораллы, пещерные и озерные отложения, а также различных климатических индексов.

Список литературы

1. Shen P.Y. and Beck A.E. // Journal of Geophysical Research 1991. V. 96. P. 19965.
2. Mareschal J.C. and Beltrami H. // Climate Dynamics 1992. V. 6. P. 135.
3. Nagornov O.V. et al. // AIP Conference Proceedings 2016. V. 1738. P. 230006.

В.В. ЦЕГЕЛЬНИК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

О РЕШЕНИЯХ СИСТЕМЫ ДВУХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СО СВОЙСТВОМ ПЕНЛЕВЕ

Рассмотрена автономная система двух дифференциальных уравнений первого порядка с квадратичной нелинейностью производных неизвестных функций. Доказано, что указанная система принадлежит к классу систем со свойством Пенлеве.

V.V. TSEGEL'NIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

ON SOLUTIONS OF A SYSTEM OF TWO NONLINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH THE PAINLEVE' PROPERTY

The autonomous system of two differential equations with quadratic nonlinearity of the derivative of unknown functions is considered. It is proved that this system belongs to the class of systems with the Painleve' property.

Исследованы аналитические свойства решений системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}x &= -y + \alpha + \frac{(y' - a)^2}{b^2(y + \beta)^2}, \\y &= -x + \alpha + \frac{(x' + a)^2}{b^2(x + \gamma)^2}\end{aligned}\tag{1}$$

с произвольными параметрами $a, b(b \neq 0), \alpha, \beta, \gamma$.

Теорема 1. Пусть $x(x' + a \neq 0), y(y' - a \neq 0)$ – произвольные функции, удовлетворяющие системе (1). Тогда при условии $(x' + a)(y + \beta) + (y' - a)(x + \gamma) = 0, b \neq 0$ они являются решениями уравнений

$$2vv'' = v'^2 + 2b^2v^3 - b^2(\alpha + \beta + \gamma)v^2 - a^2, \quad v = x + \gamma, \tag{2}$$

$$2uu'' = u'^2 + 2b^2u^3 - b^2(\alpha + \beta + \gamma)u^2 - a^2, \quad u = y + \beta \tag{3}$$

соответственно.

Уравнение (2)((3)) интегрируется в эллиптических функциях.

Теорема 2. Пусть $x(x' + a \neq 0), y(y' - a \neq 0)$ – произвольные функции, удовлетворяющие системе (1). Тогда при условии $(x' + a)(y + \beta) - (y' - a)(x + \gamma) = 0, b \neq 0$ они являются решениями уравнений

$$2vv'' = 3v'^2 + 4av' + (\alpha + \beta + \gamma)b^2v^2 + a^2, \quad v = x + \gamma, \tag{4}$$

$$2uu'' = 3u'^2 - 4av' + (\alpha + \beta + \gamma)b^2u^2 + a^2, \quad u = y + \beta \tag{5}$$

соответственно.

Уравнение (4) в случае $a = 0$ заменой $v = v_1^{-2}$ приводится к линейному уравнению $2v_1'' = -(\alpha + \beta + \gamma)v_1$.

С помощью преобразований $v = a \cdot q^{-1}(a \neq 0), q = T' \cdot T^{-1}$ и дифференцированием относительно функции T получается линейное уравнение четвертого порядка.

Приведенные выше рассуждения справедливы и по отношению к уравнению (5). Таким образом, имеет место

Теорема 3. Система (1) является системой Пенлеве-типа.

Легко видеть, что формулы (1) определяют взаимно однозначное соответствие (преобразование Беклунда) между решениями уравнений (2),(3).

Сказанное справедливо и по отношению к уравнениям (4), (5), так как уравнение (5) получается из уравнения (4) заменой $v \rightarrow u, a \rightarrow -a$.

Система (1) в случае $a = \alpha = 0, b^2 = 1$ получена в [1].

Список литературы

1. Мартынов И.П., Парманчук О.Н., Пецевич В.М. //Проблемы физики, математики и техники. 2011, № 3(8). С. 74-77.

В.А. ШЕИН², А.Г. СБОЕВ^{1,2}, Р.Б. РЫБКА²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ПУТИ В ИМИТАЦИОННОЙ СРЕДЕ

В работе рассмотрены современные алгоритмы поиска пути. Реализованы алгоритмы RRT, RRT*, LQR RRT*, A* и D* для имитационной среды со случайными препятствиями. Выявлены проблемы алгоритмов и произведен анализ их быстродействия.

V.A. SHEIN², A.G. SBOEV^{1,2}, R.B. RYBKA²

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

² National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF PATHFINDING ALGORITHMS IN A SIMULATION ENVIRONMENT

The paper considers modern algorithms for path finding. The algorithms RRT, RRT*, LQR RRT*, A* and D* are implemented for a simulation environment with random obstacles. The problems of algorithms are identified and their performance is analyzed.

В настоящее время для движения агента по заданному маршруту с учетом препятствий перспективным является создание моделей следований на базе технологий обучения с подкреплением, вместо применения алгоритмов таких как ТЕВ, DWA и др [1-2]. Настройка модели осуществляется за счет большого количества циклов обучения агента в специальной среде. Базовым элементом среды является генерация маршрута.

Существует множество алгоритмов планирования пути, решающих проблему навигации. Быстрое исследование случайных деревьев (rapidly exploring random tree, RRT) — распространенный вариант, который одновременно создает граф и находит путь. Помимо данного алгоритма, в работе исследовались его модификации, RRT* и LQR RRT* [3-5]. Суть RRT заключается в генерации случайных точек вне препятствия на всем заданном пространстве и их связкой с ближайшим соседом. RRT* и LQR RRT* модифицированы тем, что записывают функции стоимости от начальной точки до сгенерированной.

Также, в исследовании применялись алгоритмы A* и D* [6-7]. Суть алгоритмов заключается в просмотре узлов с минимальной стоимостью, которая определяется как $f(x) = g(x) + h(x)$, где $h(x)$ — это расстояние до целевой точки из текущей, $g(x)$ — это стоимость пути от начальной вершины до узла. Основное отличие D*, что стоимость пути может изменяться по мере выполнения алгоритма. Также, он начинает поиск от целевого узла к начальному.

В результате исследования были реализованы данные алгоритмы в виртуальной среде со случайными препятствиями и мостом из одной половины среды в другую. Так как RRT и его модификации изучают все свободное пространство случайным образом, то на построение графа и поиск маршрута, проходящего через мост, может уйти больше минуты, что является неудовлетворительным результатом.

При реализации алгоритмов A* и D* необходимо заранее реализовывать граф в виде пропорциональной сетке размерами 150 на 100 для нашей среды. Если использовать сетку размеров среды 1500 на 1000 пикселей, то поиск пути занимает много времени. Недостатками алгоритмов A* и D* является то, что если при генерации симуляции маршрута не существует, то они будут проверять весь граф, что займет много времени. Также, необходимо, чтобы препятствия в симуляции не появлялись вблизи целевой точки, иначе он будет перебирать все возможные узлы в окрестности. Это можно устранить, ограничив число итераций, но в таком случае алгоритм может не успеть найти путь застряв в непроходимой области, но которая является ближайшей к целевой точке.

В результате исследования было выявлено, что в моделируемой среде наибольшее быстродействие показывают алгоритмы D* и A*, так как они осуществляют оценку только некоторой области среды в отличие от алгоритмов RRT, RRT* и LQR RRT*. Среднее время поиска пути алгоритмами A* и D* около 1,5 секунд. Время поиска алгоритмами RRT и модификациями занимает больше минуты.

Работа выполнена за счет средств субсидий на выполнение госзадания (приказ от 28.10.2021 г. №2754).

Список литературы

1. C. Rösmann, W. Feiten, T. Wösch, F. Hoffmann // Proc. 7th German Conference on Robotics, 2012, pp 74–79.
2. D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. // The Dynamic Window Approach to local control.
3. LaValle, Steven M. (October 1998) // Technical Report. Computer Science Department, Iowa State University (TR 98–11).
4. Islam, Fahad; Nasir, Jauwairia; Malik, Usman; Ayaz, Yasar; Hasan, Osman; // ICMA, pages 1651–1656, August 2012.
5. A. Perez, R. Platt, G. Konidaris, L. Kaelbling, T. Lozano-Perez // ICRA, Saint Paul, MN, USA, May 2012.
6. Russell, Stuart J. (2018). Artificial intelligence a modern approach. Norvig, Peter (4th ed.).
7. Stentz, Anthony (1994) // Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation: 3310–3317.

**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

С.А. КРАТ¹, А.С. ПРИШВИЦЫН¹, А.И. АЛИЕВА¹, Н.Е. ЕФИМОВ¹, Е.А. ВИНИЦКИЙ¹,
Д.Л. УЛАСЕВИЧ^{1,2}, А.Д. ИЗАРОВА¹, Ф.С. ПОДОЛЯКО¹, А.И. МЕЩЕРЯКОВ^{1,3}, И.А. СОРОКИН^{1,4},
А.В. МЕЛЬНИКОВ^{1,2}, А.В. ГРУНИН¹, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ¹, А.В. КАЗИЕВ¹, Д.В. КОЛОДКО^{1,4},
А.С. ИСАКОВА¹, А.С. БЕЛОВ¹, К.Л. ГУБСКИЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

ТОКАМАК МИФИСТ-0: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Осуществлен физический пуск токамака. В ходе экспериментов были достигнуты следующие параметры разряда: время жизни разряда ~ 0.5 мс, ток плазмы ~ 3 кА, плотность плазмы ~ 3×10^{12} см⁻³. За период 2021 года была в ~ 30 раз увеличена энергетика токамака. Достигнуто максимальное значение тороидального поля ~ 0.8 Тл. Разработана и создана ВЧ антенна для ИЦР нагрева плазмы, осуществлён ввод дополнительной ВЧ мощности в разрядную камеру токамака в процессе разряда.

S.A. KRAT¹, A.S. PRISHVITSYN¹, A.I. ALIEVA¹, N.E. EFIMOV¹, E.A. VINITSKIY¹, D.L. ULASEVICH^{1,2},
A.D. IZAROVA¹, F.S. PODOLYAKO¹, A.I. MESHCHERYAKOV^{1,3}, I.A. SOROKIN^{1,4}, A.V. MELNIKOV^{1,2},
A.V. GRUNIN¹, L.B. BEGRAMBEKOV¹, A.V. KAZIEV¹, D.V. KOLODKO^{1,4}, A.S. ISAKOVA¹, A.S. BELOV¹,
K.L. GUBSKIY¹,

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

² National research center Kurchatov Institute

³ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

⁴ Institute of Radio-engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences

MEPHIST-0 ТОКАМАК: THE FIRST RESULTS

MEPHIST-0 tokamak was put into operation. A current-carrying discharge was created. The discharge lifetime is ~ 0.4 ms, the achieved plasma current is ~ 3 kA, and the plasma density is ~ 3×10^{12} cm⁻³. For the period of 2021, the power supply of the tokamak was increased by ~ 30 times. The maximum value of the toroidal field of ~ 0.8 T was achieved. An RF antenna for ICR plasma heating was developed and manufactured, additional RF power was introduced into the discharge chamber of the tokamak.

Проект ИТЕР (международный исследовательский термоядерный реактор) – один из крупнейших научных проектов человечества. Участие Российской Федерации подразумевает не только материальный вклад в создание непосредственно установки, но также участие отечественных ученых на каждом из этапов строительства и эксплуатации. Одним из центров подготовки квалифицированных кадров для проекта ИТЕР является НИЯУ МИФИ. На его базе в 2019-2021 годах был создан токамак МИФИСТ-0 [1] – учебно-демонстрационный сферический токамак.

Основные задачи токамака МИФИСТ-0 – подготовка научных кадров, апробация различных диагностик для термоядерных установок и проведение исследований в области взаимодействия плазмы с поверхностью. Для достижения этих целей, проводятся работы по улучшению характеристик токамака (длительность разряда, ток плазмы, средняя плотность), оснащению токамака дополнительными диагностиками. Основные параметры токамака МИФИСТ-0: большой радиус – 25 см, малый – 13 см, вертикальная вытянутость разрядной камеры ~ 2. Длительность импульса тороидального поля ~ 20-30 мс. Расчётные операционные пределы описаны в работе [2]. За период 2021 года была в ~ 30 раз увеличена энергетика токамака. Достигнуто максимальное значение тороидального поля ~ 0.8 Тл. Проведён ряд работ по магнитометрии систем токамака, оптимизирован с точки зрения рассеянных полей индуктор токамака. Разработана и создана ВЧ антенна для ИЦР нагрева плазмы, осуществлён ввод дополнительной ВЧ мощности в разрядную камеру токамака в процессе разряда. В настоящий момент для определения параметров плазмы в разрядной камере установлены магнитные датчики (катушки Мирнова), пояс Роговского. Снаружи камеры установлена диамагнитная петля, дополнительный пояс Роговского. Реализовано измерение среднехордовой плотности плазмы с помощью гетеродинного интерферометра. Также осуществлена регистрация сигнала линии Н альфа и видеосъёмка разряда со скоростью 10000 кадров в секунду. Создан универсальный механизированный подвижный ввод с возможностью быстрой смены оборудования, устанавливаемого на него, позволяющий проводить зондовые измерения, а также эксперименты по взаимодействию плазмы с поверхностью.

В ходе работ были определены параметры СВЧ предплазмы в пристеночной области с помощью зондов Ленгмюра. Для водородной плазмы плотность ~ 5×10^{10} см⁻³, электронная температура ~ 8 эВ.

Был проведен физический пуск токамака. В ходе экспериментов были достигнуты следующие параметры разряда: время жизни разряда ~ 0.5 мс, ток плазмы ~ 3 кА, плотность плазмы ~ 3×10^{12} см⁻³. Во время разряда зарегистрировано рентгеновское излучение.

Список литературы

1. V.A. Kurnaev, G.M. Vorobyov, V.E. Nikolaeva, S.A. Krat, A. V Melnikov, D.P. Ivanov, Y.M. Gasparyan, The Project of MPEPHIST Tokamak, Phys. At. Nucl. 82 (2019) 1329–1331. doi:10.1134/S1063778819100144.
2. N.A. Kirneva, G.M. Vorobjev, S.A. Ganin, A.S. Drozd, I.S. Kudashev, V.V. Kulagin, V.A. Kurnaev, WORKING AREA OF THE MEPHIST TOKAMAK: PRELIMINAR ESTIMATION, Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion. 43 (2020) 90–100. doi:10.21517/0202-3822-2020-43-3-90-100.

А.И. МЕЩЕРЯКОВ, И.А. ГРИШИНА

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

ДИНАМИКА УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ И НЕКОТОРЫЕ ЭФФЕКТЫ, ОБНАРУЖЕННЫЕ В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Представлены результаты исследования динамики удержания плазмы в стеллараторе Л-2М в режиме ЭЦР нагрева. В процессе ЭЦР нагрева было выделено четыре фазы, в каждой из которых удержание плазмы имеет свои особенности. Обнаружено, что на этапе остывания плазмы при отсутствии внешних воздействий со стороны СВЧ излучения (фаза 3) процессы самосогласования приводят к установлению канонических профилей давления электронной компоненты. При этом плазма проходит через последовательность энергетических состояний, в каждом из которых мощность потерь для данного энергосодержания минимальна.

A.I. MESHCHERYAKOV, I.A. GRISHINA

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

DYNAMICS OF PLASMA CONFINEMENT AND SOME EFFECTS DISCOVERED UNDER ECR HEATING REGIME IN THE L-2M STELLARATOR

The dynamics of plasma confinement was studied in the L-2M stellarator in the ECRH regime. Four stages of plasma confinement were distinguished that can be characterized by their own specific features. It was found that in the phase of plasma cooling in the absence of external effect of microwave radiation (phase 3), the canonical pressure profiles of the electron component are formed in the plasma due to the self-consistency processes. During its cooling, the plasma passes through a sequence of energy states; in each of them, the energy loss is minimal for a given energy content.

В экспериментах по ЭЦР нагреву плазмы в стеллараторе Л-2М, так же как и на других тороидальных ловушках, наблюдаются явления, которые еще не нашли должного объяснения. Это такие явления, как провальные в центральной части профили плотности плазмы ("density pump out" effect), «двухтемпературные» спектры мягкого рентгеновского излучения, плоские в центральной части плазменного шнура профили электронной температуры, и отклонение энергетического времени жизни от многомашинных скейлингов.

В докладе представлены результаты исследования динамики удержания плазмы в стеллараторе Л-2М в режиме ЭЦР нагрева. В процессе ЭЦР нагрева было выделено четыре фазы, в каждой из которых удержание плазмы имеет свои особенности.

В первой фазе край плазмы остается холодным, и плазма не контактирует со стенкой (detachment regime), что обеспечивает низкий уровень теплопроводностных и диффузионных потерь. Далее происходит быстрый переход (менее чем за 400 мкс) в квазистационарную фазу, когда открывается дополнительный канал потерь, связанный с появлением интенсивного потока частиц и энергии на стенку. После выключения импульса СВЧ нагрева плазма находится в состоянии, характеризуемом отсутствием внешних воздействий со стороны СВЧ излучения. Процессы самосогласования приводят к установлению в третьей фазе канонических профилей давления электронной компоненты. При этом мощность энергетических потерь минимальна [1]. На основании экспериментальных данных для стелларатора Л-2М получена следующая зависимость минимальной мощности потерь в фазе 3 от энергосодержания и плотности: $P_{\text{loss}}(W, n_e) \sim W^3 \cdot n_e^{-2}$.

Для экспериментов по ИЦР нагреву плазмы и генерации токов увлечения в стеллараторе Л-2М была создана квадрупольная антенна. Она состоит из 4-х токовых витков, расположенных в двух соседних сечениях вакуумной камеры стелларатора. На основании опыта предыдущих экспериментов [2], ожидается, что в экспериментах по ИЦР нагреву D+H плазмы мощность, излучаемая антенной, составит около $P = 200$ кВт. Также рассматривается диагностический комплекс системы ионного циклотронного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М, состоящий из измерителя падающей и отраженной волн в ВЧ фидере и системы магнитных зондов. Представлены результаты измерения сопротивления излучения одного из витков квадрупольной антенны в режиме ЭЦР нагрева плазмы ($P_{\text{ECRH}} = 200$ кВт, $n_e = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$).

Список литературы

1. Ю.Н. Днестровский. Самоорганизация горячей плазмы, М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013.
2. В. А. Батюк, Г. С. Воронов, Е. Ф. Гиппиус, и др., Физика плазмы **13**, 259 (1987).

А.Н. ШМЕЛЕВ, Г.Г. КУЛИКОВ,
В.А. АПСЭ, В.Б. ГЛЕБОВ., Е.Г. КУЛИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО КАТАЛИЗА ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В ТРЁХКОМПОНЕНТНОЙ (D-T-³HE)-ПЛАЗМЕ

Ввод в плазму сильного поглотителя нейтронов, полезного для термоядерных реакций, и использование в blankets материала с чрезвычайно малым поглощением нейтронов открывает возможность усиления совокупной цепной реакции синтеза-деления, т.е. нейтронного катализа термоядерных реакций.

A.N. SHMELEV, G.G. KULIKOV,
V.A. APSE, V.B. GLEBOV, E.G. KULIKOV

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

ASSESSMENT OF PHYSICAL CONDITIONS AND POSSIBILITY FOR NEUTRON-INDUCED CATALYSIS OF THERMONUCLEAR REACTIONS IN THREE-COMPONENT (D-T-³He)-PLASMA

Introduction of strong neutron absorber, potentially helpful material for initiation and propagation of thermonuclear reactions, into plasma composition and introduction of extremely weak neutron absorber into blanket composition can open the opportunity for intensification of the joint chain fusion-fission reaction, i.e. for catalysis of thermonuclear reactions induced by fission neutrons.

Ранее практически не рассматривалось взаимовлияние цепных реакций синтеза и деления, в которых рождаются нейтроны, т.к. плотность ионов в плазме радикально меньше ядерной плотности материалов blankets, окружающей плазму, а микросечение поглощения нейтронов в плазме существенно меньше, чем в blankets. В результате нейтроны поглощаются преимущественно в blankets.

Для преодоления гигантской разницы в поглощении нейтронов в плазме и blankets предлагается ввести в плазму сильный поглотитель нейтронов гелий-3, полезный для генерации трития и дополнительного нагрева плазмы [1]. В качестве материалов-кандидатов для blankets термоядерной установки (ТЯУ) предлагаются материалы с экстремально малым поглощением нейтронов. Оценочные модельные расчеты сферической модели ТЯУ показывают возможность создания условий воспроизводства трития в трехкомпонентной D-T-³He плазме, в следствии реакции захвата нейтронов сильным поглотителем в плазме – изотопом гелий-3. Для обеспечения устойчивого режима реакции синтеза в плазме рассмотрена также возможность улучшения нейтронного баланса путем добавления в материал blankets делящихся материалов.

В докладе в качестве материалов с экстремально малым поглощением нейтронов рассматриваются: бериллий, свинец-208, а также тяжелая вода и графит. Представлены результаты нейтронно-физических расчетов гибридной ТЯУ с blankets, содержащим нейтронный замедлитель и следующие делящиеся изотопы: уран-233, уран-235, кюрий-245. Исследованы расчетным путем варианты создания режима полного воспроизводства трития в плазме с КВТ = 1.00 и режима расширенного воспроизводства трития с КВТ существенно выше единицы при улучшенных размножающих свойствах blankets. Показана принципиальная возможность организации таких режимов работы гибридной ТЯУ, в которой термоядерные нейтроны плазмы поддерживают стационарную цепную реакцию деления в подкритическом blankets, а нейтроны деления, рожденные и замедленные в blankets, обеспечивают полное или расширенное воспроизводство трития в плазме.

Список литературы

1. Шмелев А.Н., Куликов Г.Г. О физических условиях для возникновения управляемой цепной реакции синтеза с участием нейтронов в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы. – Известия вузов. Ядерная энергетика, № 4, 2014, с. 123-129.

А.В. ГОЛУБЕВА

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Представлен обзор по взаимодействию водорода с обращёнными к плазме и конструкционными материалами. Проведено сравнение параметров взаимодействия изотопов водорода с различными материалами. Рассмотрены плюсы и минусы использования ряда материалов в термоядерных установках.

A. V. GOLUBEVA

National Research Center "Kurchatov institute", Moscow, Russia

HYDROGEN ISOTOPES INTERACTION WITH FUSION REACTORS MATERIALS

An overview of the interaction of hydrogen with plasma-facing and structural materials is presented. The parameters of the interaction of hydrogen isotopes with various materials are compared. The advantages and disadvantages of using various materials in fusion installations are discussed.

НИЦ «Курчатовский институт», anna-golubeva@yandex.ru

В термоядерных и гибридных реакторах реакция синтеза на тяжёлых изотопах водорода $D+T=He+n+17.6$ МэВ протекает в горячей плазме, удерживаемой тороидальным магнитным полем. Стенка вакуумной камеры, выполненная из конструкционного материала, не может выдержать потоки тепла и частиц, приходящие на поверхность из плазмы. Поэтому внутреннюю поверхность камеры облицовывают обращёнными к плазме материалами (ОПМ), основными из которых на данный момент являются Be, C, Li, W. К конструкционным материалам (КМ) предъявляют требования быстрого спада активности, наведённой под нейтронным облучением, и сохранения термомеханических свойств в условиях длительного облучения термоядерными нейтронами. Этим требованиям удовлетворяют некоторые аустенитные и ферритно-мартенситные стали, а также сплавы V-Cr-Ti.

В ходе работы термоядерной установки тритий будет проникать через ОПМ и КМ и накапливаться в них. Для того, чтобы обеспечить безопасность установки, нужно насколько возможно уменьшить и тщательно учитывать потери трития. Поэтому водородопроницаемость материалов термоядерных установок и их способность захватывать водород являются объектом внимательного изучения.

Данная работа представляет собой обзор, посвящённый взаимодействию водорода с ОПМ и КМ. Проведено сравнение характеристик взаимодействия изотопов водорода с различными ОПМ и КМ. Рассмотрены плюсы и минусы использования различных материалов в термоядерных установках.

Показано, что наличие недостатков, в том числе и в аспекте взаимодействия с водородом, у всех потенциально возможных к использованию ОПМ не позволяет сделать окончательный выбор в пользу какого-то одного материала.

Показано, что из всех конструкционных материалов сплавы ванадия будут захватывать наибольшее количество водорода. Потоки изотопов водорода через эти сплавы также будут максимальными. Благодаря естественному окислу на поверхности, наименьшей проницаемостью по водороду обладают ферритно-мартенситные низкоактивируемые стали, содержащие заметный процент хрома (до 12 вес. %).

Список литературы

1. A. V. Golubeva et al, JNM 2013, V.438, p. S983-S987
2. A. V. Golubeva et al., // Instr.&Exp. Techniq., 2017, Vol. 60 No. 6, p. 843-852
3. D. I. Cherkez et al., Nucl. Mater. & Energy, 2020, Vol. 23, p. 10075

ОЦЕНКА ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВНЕШНЕМ ОБВОДЕ ТОКАМАКА НА БАЗЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОДОМ SOLPS-ITER

Приведена модель для оценки радиального профиля электронной температуры на внешнем обводе токамака в SOL в виде степенной функции. Данная модель основывается на результатах моделирования кодом SOLPS-ITER [1]. Полученное решение хорошо согласуется как и с результатами моделирования, так и с экспериментальными данными для разных токамаков.

A.G. POLETAEVA¹, E.G. KAVEEVA¹, V.A. ROZHANSKY¹, I. YU. SENICHENKOV¹, I. YU. VESELOVA¹
¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya 29, 195251 St. Petersburg, Russia

THE ESTIMATION OF ELECTRON TEMPERATURE PROFILE AT EQUATORIAL OUTER MIDPLANE BASED ON SOLPS-ITER SIMULATIONS

Simple model for OMP electron temperature estimation in SOL as a radial power function is observed. This model is based on SOLPS-ITER simulation results. The obtained solution is in a good agreement with the simulation results and experimental data for different tokamaks.

Для оценки радиального профиля электронной температуры на внешнем обводе в SOL принято использовать экспоненциальную аппроксимацию [2]. Однако, наблюдаемое в эксперименте и в моделировании распределение электронной температуры существенно отличается от экспоненты с увеличением радиальной координаты и имеет более медленный характер спада в дальнем SOL подобно степенной зависимости $T(y)$. Такое поведение электронной температуры связывают с увеличением коэффициентов поперечного аномального переноса с радиальной координатой. В данной работе предлагается простая модель для оценки электронной температуры на внешнем обводе. Показано, что электронная температура спадает радиально по степенному закону даже в случае постоянных коэффициентов аномально переноса.

В модели предполагается, что продольный поток тепла определяется только классической Спитцеровской теплопроводностью, а радиальный поток тепла определяется только аномальным переносом $q_{\perp} = -n\chi_{\perp}\nabla_{\perp}T_e$ и сосредоточен в экваториальной плоскости на внешнем обводе. Используя двухточечную модель [3], можно записать уравнение для баланса тепла, решением которого будет степенная функция для электронной температуры от радиальной координаты:

$$\frac{\partial^2 T_e}{\partial y^2} = \frac{2}{7} \frac{k_o T_e^{7/2}}{en\chi L_p^2} \rightarrow T_e(y) = \left(\frac{y + c T_e|_{sep}^{-5/4}}{c} \right)^{4/5}, c = \frac{3\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} \frac{4}{5} \sqrt{\frac{en\chi L_p^2}{k_o}}, L_p: \alpha qR, \alpha: 2 \div 3 \quad (6)$$

Данное решение сравнивалось с результатами моделирования кодом SOLPS-ITER и экспоненциальной аппроксимацией для токамаков AUG, JET, ITER, а также с экспериментальными данными для токамаков AUG и JET.

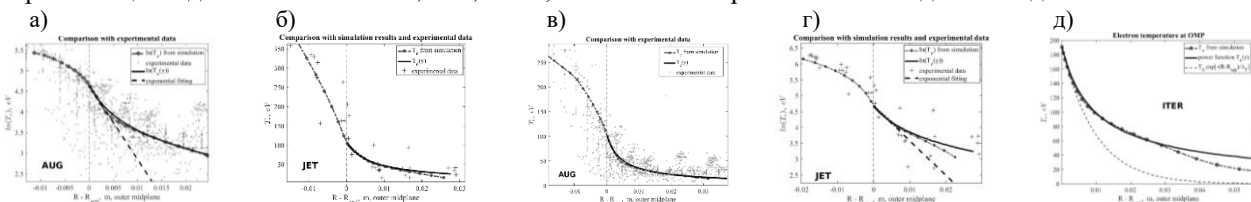


Рис. 1. Сравнение полученного решения $T_e(y)$ с экспериментальными данными, результатами моделирования и экспоненциальной аппроксимацией для токамаков AUG (а,в) и JET (б,г), с результатами моделирования и экспоненциальной аппроксимацией для токамака ITER (д). Рисунки (а) и (б) представлены в логарифмическом масштабе.

Как видно из рис.1, полученное степенное решение хорошо согласуется как и с экспериментальными данными, так и с результатами моделирования и лучше описывает распределение электронной температуры по сравнению с экспонентой. В работе также проанализировано влияние на полученное решение более сложных механизмов переноса тепла, учтенного в моделировании кодом SOLPS-ITER и показано, что ряд факторов может привести к поправкам порядка единицы в полученном решении, что, однако, не повлияет на степенной характер спада электронной температуры.

Список литературы

1. X. Bonnin et al // Plasma and Fusion Research: Regular Articles 2016. V.11, 1403102
2. H J Sun et al // Plasma Phys. Control. Fusion 2015. V.57, №12. 125011
3. P C Stangeby // Plasma Phys. Control. Fusion 2000. V. 42, № 12B. B271

Е.Д. МАРЕНКОВ¹, А.А. ПШЕНОВ^{1,2}, А.С. КУКУШКИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ И ТЕЧЕНИЯ ЛИТИЯ В ТОКАМАКЕ T-15MD В КОДЕ SOLPS 4.3

Проведено моделирование конфигурации токамака T-15MD с литиевыми мишенями дивертора в коде SOLPS 4.3. Показано, что при достаточно большой мощности, существенную роль играют процессы экранирования мишеней эродированным материалом, ограничивая тепловую нагрузку на мишени. Вместе с тем, загрязнение основной плазмы Li в таких режимах оказывается существенным. Проанализировано течение Li в диверторе и условия выживания мишеней.

E.D. MARENKOV¹, A.A. PSHENOV^{1,2}, A.S. KUKUSHKIN^{1,2}

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

²National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

MODELING LITHIUM EROSION AND FLOW IN T-15MD TOKAMAK DIVERTOR USING SOLPS 4.3 CODE

Self-replenishing coatings for divertor targets are considered as an alternative to full-W divertor designed for ITER and proposed for some future DEMO concepts. Li, Sn, and their alloy are considered the most appropriate for this. Target survival and core plasma contamination are the key issues to address when designing the divertor. These issues can be addressed using 2D plasma codes such as SOLPS or UEDGE. However, in the standard versions of these codes, the calculation of target erosion is done without taking into account the evaporation and thermal sputtering, which are important for the liquid divertor coatings.

The recent modification of the SOLPS 4.3 code to include these processes was developed in our group. In contrast to the SOLPS-ITER version used in the TECXY code, we apply the full Monte-Carlo treatment of the Li and H neutrals.

Using the modified SOLPS 4.3 version, we model the T-15MD tokamak geometry to analyze the divertor performance with Li-coated targets. It is shown that vapor shielding effects can be quite pronounced at sufficiently large power. However, plasma dilution with Li is strong in these regimes. The distribution of Li in the divertor, the total power losses, the average charge Z_{eff} , and plasma dilution with Li are reported. We study in detail, for the first time, the 2D Li flow patterns and Li redeposition in the regimes with strong shielding. We discuss the applicability of the 0D shielding models in realistic tokamak geometry. The redeposition factors including prompt redeposition and the effective shielding energy, i.e. the energy dissipated per an eroded particle, are also calculated.

Возобновляемые покрытия для мишеней дивертора рассматриваются как альтернатива для цельнометаллического дивертора токамака ИТЭР и некоторых проектов реактора ДЕМО. Литий, олово и их сплав рассматриваются чаще всего для этих целей. Основными проблемами таких мишеней являются их выживание под действием интенсивных нагрузок из плазмы и загрязнение основной плазмы продуктами эрозии. Эти параметры могут быть оценены расчетами в двухмерных кодах, таких как SOLPS и UEDGE. Вместе с тем, в стандартных версиях этих кодов не учитываются процессы эрозии, критичные для расчетов мишеней из Li или Sn, а именно испарение и термическое распыление. В нашей группе недавно была проведена модификация кода SOLPS 4.3 включающая эти процессы [1].

Используя модифицированный таким образом код SOLPS 4.3, мы провели моделирование конфигурации токамака T-15MD с литиевыми мишенями дивертора. Показано, что при достаточно большой мощности существенную роль играют процессы экранирования мишеней эродированным материалом, ограничивая тепловую нагрузку на мишени. Вместе с тем, загрязнение основной плазмы Li в таких режимах оказывается существенным. Также были получены распределение Li в диверторе, основные каналы потерь на экранирование, средний заряд, поток эрозии мишени и другие величины, критичные для понимания режима работы дивертора. Впервые подробно рассмотрена картина двухмерного течения Li и проанализирована редепозиция Li в режимах с сильным экранированием. Показано, что перетекание Li между внутренним и внешним диверторами несущественно, по сравнению с поперечным переносом. Весь эродированный Li быстро ионизируется и либо возвращается на ту же мишень, либо уносится поперек поля на стенку и в основную плазму.

Также вычислен коэффициент редепозиции и эффективная энергия экранирования. Коэффициент редепозиции может быть разделен на две части: коэффициент быстрой редепозиции γ_p и «плазменную» редепозицию, то есть возврат ионов Li из плазмы назад на мишень. Коэффициент быстрой редепозиции получается довольно большой, $\gamma_p > 95\%$, из-за сравнительно больших температур плазмы у пластин, $T_e > 10$ эВ. Вместе с тем, «плазменная» редепозиция несколько меньше, порядка 80%. Следовательно, полная редепозиция составляет порядка 90%, что меньше, чем часто встречающееся в литературе 99%.

Значения эффективной энергии экранирования, то есть энергии потерь на экранирование, приходящейся в среднем на одну эродированную частицу, оказались порядка 200 эВ, если не включать γ_p в определение потока эрозии. Мы подробно рассмотрели ограничения применимости нульмерного приближения [2] эффективной энергии в реалистичной двухмерной геометрии. Несмотря на некоторые сложности по сравнению, например, с линейными плазменными установками, этот подход может быть применен к токамаку с дивертором для оценки эффективности экранирования.

Работа выполнялась за счет средств гранта РФФ №18-12-00329.

Список литературы

1. Marenkov E. et al, Nucl. Fusion 61 (2021)
2. Skovorodin D. et al, Phys. Plasmas 23 022501 (2016); Rindt P. et al, Nuclear Fusion 58 104002 (2018)

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛАМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Приведено краткое описание диагностики доплеровского обратного рассеяния, установленной на модернизированном токамаке Глобус-М2. Представлены экспериментальные результаты регистрации филаментов, полученные с помощью данной диагностики в различных режимах работы токамака, в том числе и в разрядах с применением двух инжекторов быстрых частиц.

К.А. KUKUSHKIN¹, A.YU. YASHIN¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation

FIRST RESULTS OF INVESTIGATION OF FILAMENTOUS STRUCTURES USING DOPPLER BACKSCATTERING DIAGNOSTICS ON GLOBUS-M2 TOKAMAK.

A brief description of the diagnostics of Doppler backscattering installed on the upgraded tokamak Globus-M2 are given. Experimental results of registration of filaments obtained with the help of mentioned diagnostics in various modes of operation of the tokamak, including discharges with the use of two fast particle injectors, are presented.

Исследование филаментов – нитевидных неоднородностей плазмы, возникающих в районе пьедестала при достижении определенного порога давления плазмы в этой области, играет важную роль в улучшении удержания плазмы в токамаке. Развитие этих неоднородностей приводит к потере частиц и энергии, а также повышению тепловой нагрузки на стенки камеры и дивертор токамака [1].

Исследования филаментов в плазме токамака Глобус-М с помощью диагностики доплеровского обратного рассеяния (ДОР) хорошо освещены в различных публикациях и выступлениях [2]. Модернизация установки до версии Глобус-М2 позволила добиться выдающегося увеличения параметров плазмы [3]. В данной работе рассматривается обнаружение филаментов с помощью диагностики ДОР в новых условиях Глобус-М2, в том числе и в разрядах с нагревом с помощью двух инжекторов нейтральных частиц.

Основной используемой диагностики служат два рефлектометра с наклонным падением, с суммарным числом каналов равным 10, использующие диапазон частот зондирования от 20 ГГц до 75 ГГц [4]. Движение филамента мимо зондирующей антенны приводит к появлению квазикогерентного цуга колебаний в принимаемом сигнале, частота цуга соответствует частоте доплеровского сдвига обратно рассеянного излучения, что позволяет определить полоидальную скорость филамента. Большое число каналов позволяют одновременно исследовать несколько областей плазмы, т. к. излучение различных частот имеет различные области отсечки внутри плазмы [4].

Исследовались как разряды, во время которых нагрев плазмы производился одним инжектором нейтральных частиц, так и разряды с нагревом с помощью двух инжекторов. Выполнялся поиск филаментов, возникающих во время периферийной локализованной моды (ELM). Пример ELM изображен на рисунке 1. пилообразные колебания, непосредственно инициирующие формирование пилинг-баллонной неустойчивости и соответственно ELM приведены на рис. 1а. ELM характеризуется пиком сигнала диагностики D_α (рис. 1б) и всплеском активности сигнала магнитного зонда (рис 1с). На рис.1д приведен непосредственно сам комплексный сигнал диагностики доплеровского обратного рассеяния, а на рис.1е – спектрограмма сигнала этой диагностики. В сигнале присутствуют цуги квазикогерентных колебаний высокой частоты, а в спектрограмме - соответствующие им максимумы. Вышеперечисленные данные подтверждают обнаружение нитевидных образований в плазме токамака Глобус-М2 в моменты образования ELM. В докладе приведены данные о параметрах таких филаментов, возникающих как в разрядах с нагревом двумя инжекторами быстрых частиц, так и в разрядах с одним инжектором. Определены скорости их распространения, полоидальный и радиальный размеры, а также исследована их пространственная структура. Полученные результаты согласуются с численными расчётами пилинг-баллонной неустойчивости, возникающей во время ELM.

Рис. 1. Сигналы мониторинговых диагностик, ДОР и спектрограмма сигнала ДОР, соответствующие периферийной локализованной моде (ELM)

Список литературы

1. Kamiya K., Asakura N., Boedo J. and others // Plasma Phys. Control. Fusion 2007. V.49, №7. P. S43
2. Yashin, A., Bulanin, V., Petrov, A., Ponomarenko, A. // Appl. Sci. 2021. V.11, №19, 8975
3. Kurskiev G. S., Gusev V. K., Sakharov N.V., and others // Nucl. Fusion 2021. V.61 №6, 064001
4. Yashin A.Y., Bulanin V.V., Gusev V.K., and others // JINST 2022 V.17 C01023

Я.М. АММОСОВ^{1,2}, Ф.О. ХАБАНОВ¹, М.А. ДРАБИНСКИЙ¹, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ¹, А.В. МЕЛЬНИКОВ^{1,3}, Н.К. ХАРЧЕВ^{1,4},
С.Е. ЛЫСЕНКО¹

¹НИИ "Курчатовский институт", Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва

³НИИЯУ Московский инженерно-физический институт, Россия

⁴Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

РАДИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАМ И КВАЗИКОГЕРЕНТНОЙ МОДЫ В ОМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10

Доклад посвящён радиальным характеристикам геодезической акустической моды (ГАМ) и квазикогерентной моды (ККМ) в омической плазме токамака Т-10. ККМ соответствует основная часть турбулентного потока частиц, ГАМ как высокочастотная ветвь зональных течений участвует в регуляции турбулентности, что делает эти объекты весьма важными для физики плазмы.

Y.M. AMMOSOV^{1,2}, F.O. KHABANOV¹, M.A. DRABINSKY¹, L.G. ELISEEV¹, A.V. MELNIKOV^{1,3}, N.K.
KHARCHEV^{1,4}, S.E. LYSENKO¹

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

²Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

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

⁴Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

RADIAL FEATURES OF GAM AND QUASI-COHERENT MODE IN T-10 TOKAMAK OHMIC PLASMAS

This paper is dedicated to radial distributions of the quasi-coherent (QCM) and geodesic acoustic modes (GAM) in the ohmic plasmas of the T-10 tokamak. QCM corresponds to major fraction of turbulent particle flux, GAM affects the turbulence regulation as the high-frequency branch of the zonal flows which makes these objects very important for the plasma physics.

В физике высокотемпературной плазмы одной из главных проблем является существенная разница между теоретически предсказываемыми и получаемыми в эксперименте потоками тепла и частиц из плазмы на стенку. Потоки, не описываемые физической теорией, называются аномальными. По современным представлениям аномальные потоки обусловлены наличием в плазме мелкомасштабной турбулентности. Важную роль в процессах удержания играют зональные течения, которые рассматриваются как механизм саморегуляции турбулентности в плазме [1]. Высокочастотной ветвью зональных течений является геодезическая акустическая мода (ГАМ) [2]. Было установлено, что ГАМ взаимодействует с широкополосной турбулентностью в широкой области ионно-дрейфовых частот (100–300 кГц) [3]. Так как ГАМ участвует в регуляции турбулентности, научное сообщество проявляет большой интерес к изучению свойств данной моды.

Одним из методов позволяющих проводить комплексные исследования турбулентности и зональных течений в периферийной и горячей областях плазмы токамака является зондирование пучком тяжелых ионов (ЗПИ) [4]. ЗПИ – единственный метод прямого измерения потенциала плазмы тороидальных магнитных установок в центральных областях плазмы. Помимо среднего значения потенциала диагностика позволяет одновременно и независимо измерять колебания электрического потенциала, плотности плазмы и полоидального магнитного поля.

С использованием ЗПИ на токамаке Т-10 были измерены следующие характеристики ГАМ и ККМ.

На токамаке Т-10 ($R = 1.5$ м, $a = 0.3$ м, $B \leq 2.5$ Тл, $I_{pl} \leq 300$ кА) было показано, что основная часть турбулентного потока частиц в омической стадии разряда связана с квазикогерентной модой (ККМ, $f \approx \Delta f$) [5]. Изучение свойств ККМ позволит лучше понять природу турбулентного потока частиц. Для режима $B_t = 2.2$ Тл, $I_{pl} = 230$ кА, $n_e = 1 \cdot 10^{19}$ м⁻³ были измерены радиальные распределения частоты и интенсивности ККМ в радиальном диапазоне $0.3 \leq r/a \leq 1$ для омической и СВЧ стадий разряда [6,7]. Для режима с магнитным полем $B_t = 1.7$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 200$ кА, плотностями $n_e = 1 \cdot 10^{19}$ м⁻³ и $n_e = 1.6 \cdot 10^{19}$ м⁻³ было проведено исследование радиальной структуры ГАМ и ее сателлита в широком пространственном диапазоне плазменного шнура ($0.2 < r/a < 1$) токамака Т-10 [8]. В данной работе представлены радиальные распределения частоты и интенсивности ККМ и ГАМ, полученные с помощью ЗПИ в омической плазме в различных режимах работы токамака Т-10:

1. $B_t = 2.25$ Тл, $I_{pl} = 180 - 230$ кА, $n_e = 2 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $0.6 \leq r/a \leq 0.8$;
2. $B_t = 2.4$ Тл, $I_{pl} = 250$ кА, $n_e = 2.7 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $0.7 \leq r/a \leq 0.9$;
3. $B_t = 1.7$ Тл, $I_{pl} = 200$ кА, для плотностей $n_e = 1 \cdot 10^{19}$ м⁻³ и $n_e = 1.6 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $0.2 \leq r/a \leq 0.8$;
4. $B_t = 1.7$ Тл, $I_{pl} = 200$ кА, $n_e = 1.3 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $0.2 \leq r/a \leq 0.8$.

Список литературы

1. Fujisawa A, Ido T, Shimizu A, et al. Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas. *Nucl Fusion*. 2007;47(10).
2. Conway GD Smolyakov AI, Ido T. Geodesic acoustic modes in magnetic confinement devices. *Nucl Fusion*. 2022;62(013001):149pp.
3. Melnikov A V et al. Study of interactions between GAMs and broadband turbulence in the T-10 tokamak. *Nucl Fusion*. 2017;57(11).
4. Melnikov A V et al. Heavy ion beam probing - Diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas. *Nucl Fusion*. 2017;57(7).
5. Eliseev LG et al. Evaluation of turbulent particle flux by heavy ion beam probe in the T-10 tokamak. *Plasma Fusion Res*. 2018;13
6. Drabinskiy MA et al. Radial structure of quasi-coherent mode in ohmic plasma of the T-10 tokamak. *J Phys Conf Ser*. 2019;1383:012004.
7. Drabinskiy MA et al. Quasi-coherent mode evolution in discharges with positive radial electric field at the T-10 tokamak. *J Phys Conf Ser*. 2021;2055(1).
8. Melnikov A V. et al. GAM and broadband turbulence structure in OH and ECRH plasmas in the T-10 tokamak. *Plasma Fusion Res*. 2018;13:4-6.

С.Д. СУНЦОВ^{1,2}, Г.А. САРАНЧА^{1,3}, А.В. МЕЛЬНИКОВ^{1,2,3}, М.А. ПОПОВА², Н.Н. КАСИМОВА², Г.П. ТИМКОВСКИЙ²,
А.М. СТОЛБОВ², А.Ю. БАЛАШОВ¹, А.В. СТЕПИН¹, А.А. ЛОГИНОВ³, О.Т. КАЛИНИНА³

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³ Национальный исследовательский университет МФТИ, Долгопрудный, Россия

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ТОКАМАКЕ GOLEM

Исследована эволюция колебаний в водородной плазме токамака GOLEM. Показано существование МГД-моды $m=2$, а также широкополосной магнитной и электростатической турбулентностей и измерена скорость их полоидального и тороидального вращений.

S.D. SUNTISOV^{1,2}, G.A. SARANCHA^{1,3}, A.V. MELNIKOV^{1,2,3}, M.A. POPOVA², N.N. KASIMOVA², G.P. TIMKOVSKY²,
A.M. STOLBOV², A.YU. BALASHOV¹, A.V. STYOPIN¹, A.A. LOGINOV³, O.T. KALININA³

¹ National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

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

³ National Research University MIPT (Moscow Institute of Physics and Technology), Dolgoprudny, Russia

CORRELATION ANALYSIS OF ELECTROSTATIC AND MAGNETIC OSCILLATIONS IN THE GOLEM TOKAMAK

The evolution of the oscillations in the hydrogen plasma of the GOLEM tokamak is studied. The existence of MHD mode $m = 2$, broadband magnetic and electrostatic turbulence is shown, and the speed of their poloidal and toroidal rotations is measured.

Возникновение глобальных магнито-гидродинамических мод с низкими модовыми числами ($n, m < 2$) создают опасность их спонтанного развития вплоть до срыва плазменного разряда, порой опасного для самого существования установки, как например, для ИТЭР. Исследование структуры плазменных колебаний в широком частотном диапазоне и динамики их развития является актуальной задачей физики плазмы. Такие исследования особенно актуальны для токамаков малых размеров [1], в которых срывы разряда не причиняют ущерба инженерным системам установки. Перенос частиц и энергии в тороидальной плазме является аномальным, он определяется турбулентностью. Исследования свойств турбулентности и способов ее подавления – актуальная задача физики плазмы, исследуемая на всех современных установках, здесь важен вклад как крупных, так и малых токамаков [2].

Малый круглый токамак GOLEM, работающий в Чешском техническом университете в Праге, имеет большой радиус $R = 0,4$ м, малый радиус $r = 0,1$ м, тороидальное магнитное поле $B_t < 0,5$ Тл, ток плазмы $I_{pl} < 10$ кА, длительность разряда $\tau < 20$ мс. Эксперимент на GOLEMe, включающий установку параметров и получение разряда, сбор, хранение и визуализацию экспериментальных данных, может быть организован дистанционно через Web-интерфейс [3]. Параметры плазмы GOLEMa близки к параметрам первой стадии работы токамака МИФИСТ-0 [4].

С помощью зондов Ленгмюра и магнитных зондов на GOLEMe было проведено исследование электростатических и магнитных колебаний. С помощью кросс-корреляционного анализа обнаружены низкочастотные МГД-колебания и определено полоидальное модовое число $m = 2$ (рис. 1а). Показано наличие широкополосной ($f < 300$ кГц) магнитной (рис. 1б) и электростатической (рис. 1в) турбулентности, определены скорости их тороидального, а для магнитной - ещё и полоидального вращений.

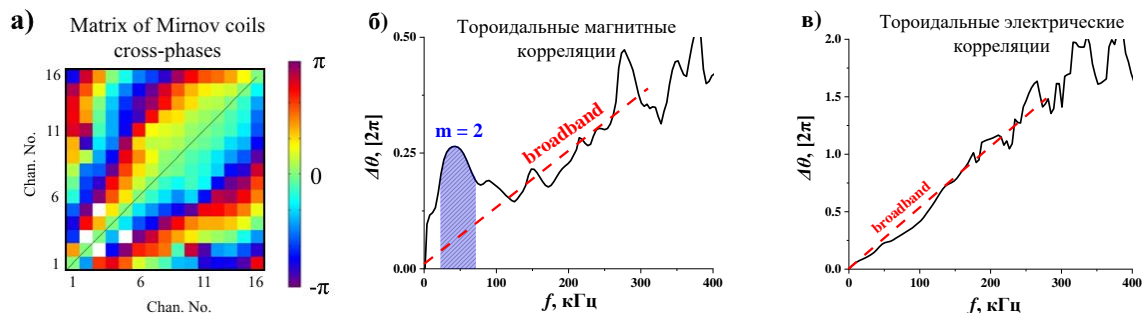


Рис. 1. а) Матрица кросс-фаз между сигналами магнитных зондов, расположенных в одном полоидальном сечении на частоте МГД-моды показывает $m = 2$, б) спектр кросс-фазы магнитных колебаний в) спектр кросс-фазы электростатических колебаний

Список литературы

- [1] Gryaznevich M.P. and others // Plasma Sci. Technol. 2020. Vol. 22. P. 055102.
- [2] Svoboda V. and others // Fusion Eng. Des. 2011. Vol. 86. P. 1310-1314.
- [3] Stöckel J. and others // Plasma Phys. Control. Fusion 1999. Vol. 41, P. A577.
- [4] Kurnaev V.A. and others // Physics of Atomic Nuclei 2019. Vol. 82, № 10, P. 1329-1331.

Д.Е. ДИАС МИХАЙЛОВА¹, А.С. ДРОЗД^{1,2}, А.С. КИРИЛЛОВ¹, Д.С. СЕРГЕЕВ¹

¹НИИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОЦЕНКА ФАЗОВОГО ЭФФЕКТА В СИГНАЛАХ ВЕРТИКАЛЬНОГО КАНАЛА СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-15МД

В работе рассматривается влияние плазмы на сигнал промежуточной частоты вертикального канала СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД. Представлены результаты расчетов фазового сдвига и оценена величина изменения промежуточной частоты для омического разряда Т-15МД и для разряда с инжекцией дейтериевой пеллеты.

D.E. DIAS MIKHAYLOVA¹, A.S. DROZD^{1,2}, A.S. KIRILLOV¹, D.S. SERGEEV¹

¹NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

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

ESTIMATION OF PHASE EFFECT IN SIGNALS OF A VERTICAL CHANNEL OF A MICROWAVE INTERFEROMETER IN PLASMA DENSITY MEASUREMENTS ON THE T-15MD TOKAMAK

Effect of plasma on signals from a microwave interferometer of the T-15MD tokamak is considered. The results of phase shift calculations are presented. Shifts in an intermediate frequency value for an ohmic discharge scenario and for a discharge with deuterium pellet injection are estimated.

В НИИЦ "Курчатовский институт" на токамаке Т-15МД [1] средняя электронная плотность плазмы измеряется по вертикальному каналу СВЧ-интерферометра [2]. Зондирование плазмы проводится на обыкновенной волне с длиной волны зондирующего излучения 0.9 мм, а измерения проводятся на промежуточной частоте в 5 МГц.

При просвечивании плазмы обыкновенными волнами с частотой значительно выше плазменной, фаза зондирующего излучения отражает среднюю на пути зондирования плотность плазмы [3]. Обычно значение, на которое изменяется фаза сигнала, многократно превышает величину 2π , что может приводить к неопределенности при трактовке экспериментальных данных. Также высокая скорость изменения фазы сигнала может привести к кратковременному выходу сигнала из рабочего диапазона электроники в системе обработки данных [4].

На верхнем патрубке токамака Т-15МД расположен передатчик СВЧ излучения, а на нижнем – приемник, на которые подаются сигналы от блока синтезатора. В нем от одного задающего кварцевого резонатора REF генерируются сигналы с частотами 7.282 ГГц, 7.280 ГГц, 85 МГц, а также выводится сигнал с задающего кварца (ВС) частотой в 10 МГц. Зондирующее СВЧ излучение формируется в блоке передатчика посредством умножения по частоте в 44 раза сигнала 7.282 ГГц. Прошедшее через плазму излучение поступает в приемнике на смеситель по второй гармонике, куда также подается предварительно умноженный в 22 раза по частоте сигнал 7.280 ГГц. На выходе смесителя формируется сигнал промежуточной частоты 80 МГц (ПЧ1), который вместе с сигналом 85 МГц поступает на расположенный в блоке синтезатора смеситель. В результате формируется сигнал на промежуточной частоте 5 МГц (ПЧ2), который несет в себе информацию о фазе зондирующего излучения и поступает в систему сбора и обработки сигналов. Для синхронизации используется сигнал ВС, который также может быть использован в качестве опорного сигнала. Частоты сигналов ПЧ2 и ВС отличаются ровно в 2 раза.

В работе представлен результат расчета фазового сдвига в сигналах вертикального канала СВЧ-интерферометра, величина которого составила от 5 до 80 полос по 2π в зависимости от величины средней плотности плазмы токамака Т-15МД. Для оценки фазового эффекта в сигналах вертикального канала СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД был проведен анализ экспериментальных данных СВЧ-интерферометра токамака Т-10. Анализ проводился путем масштабирования: эволюция электронной концентрации плазмы считалась подобной, но различались геометрические размеры плазменного шнура. В результате расчетов для омического плазменного разряда изменение фазы в сигналах СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД будет приводить к изменению частоты ПЧ2 на величину до 5 кГц. При масштабировании разряда с инжекцией дейтериевых пеллет наблюдается резкое увеличение плотности плазмы, что приводит к изменению частоты ПЧ2 на величину порядка 100 кГц. Также была проведена оценка фазового эффекта от инжекции в плазму токамака Т-15МД дейтериевой пеллеты с помощью используемого на токамаке Т-10 инжектора. В этом случае изменение фазы в сигналах вертикального канала СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД приводит к изменению частоты сигнала ПЧ2 на 10 кГц. Фазометр способный обрабатывать сигналы в таком диапазоне изменений параметров может быть реализован на базе фазовых детекторов AD8302 и микроконтроллера [5].

Список литературы

1. Хвостенко П.П. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. Вып. 1. С.15.
2. Сергеев Д.С., Неруш М.Н. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 2. С.49.
3. Veron D. New York: Academic Press, 1979.
4. Хилиль В.В. В сб. Диагностика плазмы, в.3, Москва, Атомиздат, 1973 г., С.404.
5. Дрозд А.С., Сергеев Д.С., Игонькина Г.Б. // Сборник тезисов XIX Всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы". С.190. ISBN 978-5-89513-499-3 Сочи, РФ.

A.A. МАКАРОВ¹, С.А. КРАТ¹, Д.Л. КИРКО¹, Н.Е. ЕФИМОВ¹, А.С. ПРИШВИЦЫН¹, А.И. АЛИЕВА¹, А.С. САВЁЛОВ¹
Г.Х. САЛАХУТДИНОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА МЯГКОЙ КОМПОНЕНТЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ «МИФИСТ»

Произведены измерения спектра мягкой компоненты рентгеновского излучения плазмы, получаемой на установке токамак «МИФИСТ». Измерения проводились методом серых фильтров с использованием многоканального спектрометра на основе термоллюминесцентных детекторов. На основе полученных экспериментальных спектров мягкой компоненты рентгеновского излучения была проведена оценка электронной температуры плазмы, которая составила порядка 30 эВ.

A.A. MAKAROV¹, S.A. KRAT¹, D.L. KIRKO¹, N.E. EFIMOV¹, A.S. PRISHVITSYN¹, A.I. ALIEVA¹, A.S. SAVELOV¹, G.Kh. SALAKHUTDINOV¹

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

MEASUREMENT OF THE SOFT SPECTRAL COMPONENT OF THE X-RAY EMISSION OF PLASMA ON THE “MEPHIST” TOKAMAK

The measurements of the soft spectral component of the X-ray emission of plasma on the «MEPHIST» tokamak were carried out. Measurements were conducted by the "gray" filters technique via a multichannel spectrometer with thermoluminescent detectors. Based on the experimentally obtained spectra of the soft X-ray component, the plasma electron temperature was estimated to be about 30 eV.

Рентгеновская диагностика плазменных объектов является одним из основных методов получения информации о параметрах излучающей плазмы, таких как электронная температура и плотность плазмы [1]. На основе измеренных спектров мягкой компоненты рентгеновского излучения была проведена оценка электронной температуры плазмы, которая составила порядка 30 эВ.

Установка «МИФИСТ» представляет собой малый сферический токамак ($a = 13$ см, $R = 24$ см), созданный на кафедре физики плазмы НИЯУ МИФИ [2]. Проведенные оценки величины температуры по формуле Арцимовича дали значение, сравнимое с оценкой, сделанной из анализа спектра мягкой компоненты рентгеновского излучения - 30 эВ.

Одним из наиболее распространенных методов измерения спектра импульсного рентгеновского излучения является метод «серых» фильтров поглощения [3-6]. Данный метод основан на спектральной селекции первичного рентгеновского излучения. Для измерения спектра импульсного рентгеновского излучения применяют различные многоканальные спектрометрические системы с предварительным разделением квантов по энергиям с помощью рентгеновских фильтров поглощения.

В качестве детекторов импульсного рентгеновского излучения были использованы термоллюминесцентные детекторы (ТЛД) из фторида лития LiF [3,6]. Термоллюминесцентные детекторы LiF нечувствительны к электромагнитным наводкам, не требуют оперативной системы считывания сигнала, слабо реагируют на ультрафиолетовое излучение по сравнению с рентгеновским, имеют высокий диагностический диапазон поглощенной дозы излучения (от 20 мЗв до 10 Зв).

Также для измерения спектра рентгеновского излучения использовался одноканальный, малогабаритный, помехоустойчивый спектрометр (Ø5x12 мм), представляющий сборку из термоллюминесцентных детекторов фторида лития LiF, расположенных друг за другом. В данном случае фильтрами поглощения, осуществляющими спектроселекцию рентгеновского излучения, служили сами термоллюминесцентные детекторы. С помощью данных спектрометров были проведены измерения спектров рентгеновского излучения плазмы в энергетическом диапазоне квантов от 1 до 25 кэВ на токамаке «МИФИСТ» и оценена электронная температура плазмы.

Список литературы

1. Анциферов П.С., Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. Вып. 8. С. 1018.
2. Н.А. Кирнева, Г.М. Воробьев, С.А. Ганин, А.С. Дрозд, И.С. Кудашев, В.В. Кулагин, В.А. Курнаев // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, С. 90.
3. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2015. № 1. С. 100.
4. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 89.
5. I. G. Grigoryeva, V. A. Kostyushin, G. Kh. Salakhutdinov // Plasma Physics Reports, 2019, Vol. 45, No. 11, pp. 1066–1070.
6. I G Grigoryeva, M V Khil'ko, G Kh Salakhutdinov // Journal of Physics: Conference Series, 2019 Vol. 1390, No. 1.

Е.Ю. БРАГИН¹, Е.А. БУНИН¹, А.С. ДРОЗД^{1,2}, Д.С. СЕРГЕЕВ¹, А.Е. СУХОВ¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ГЕТЕРОДИННЫМ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ 95 ГГц НА СТЕНДЕ ПН-3

Рассмотрены первые результаты измерений электронной плотности плазмы в установке ПН-3 с помощью СВЧ-интерферометра 95 ГГц. Приведена блок-схема гетеродинного СВЧ-интерферометра 95 ГГц установки ПН-3. Показаны результаты измерений в экспериментах по исследованию зависимости плотности плазмы от расхода рабочего газа, а также от величины магнитной индукции и от профиля магнитного поля в области геликонной антенны.

E. Y. BRAGIN¹, E. A. BUNIN¹, A. S. DROZD^{1,2}, D. S. SERGEEV¹, A. E. SUKHOV¹

¹ NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

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

FIRST RESULTS OF PLASMA DENSITY MEASUREMENTS WITH A 95 GHz HETERODYNE MICROWAVE INTERFEROMETER AT THE PN-3 DEVICE

First results of measuring the electron plasma density at the PN-3 device with microwave interferometer are considered. A block diagram of 95 GHz heterodyne microwave interferometer of the PN-3 device is presented. The measurement results in experiments on studying the dependence of the plasma density on the flow rate of the operating gas, as well as on the magnitude of the magnetic induction and on the profile of the magnetic field in the area of the helicon antenna are shown.

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» проводятся эксперименты на стенде ПН-3 (рис. 1) [1], который является макетом геликонного двигателя [2]. Ключевой составляющей геликонного источника является система генерации высокочастотной мощности. На стенде ПН-3 эту роль выполняет работающий в телеграфном режиме передатчик ПКМ-20М.

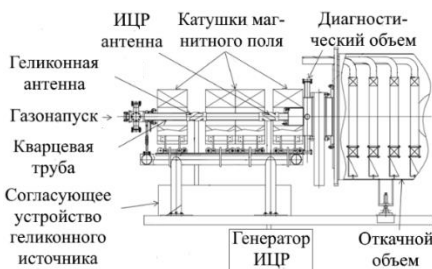


Рисунок 1. Принципиальная схема установки ПН-3

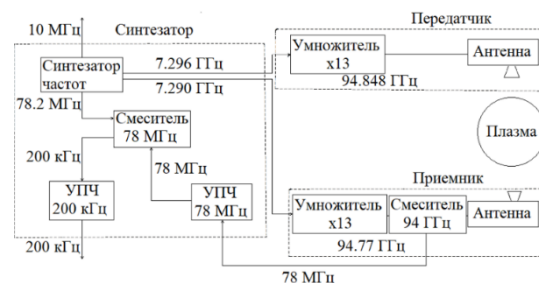


Рисунок 2. Блок-схема СВЧ-интерферометра 95 ГГц

Для измерения параметров плазменного потока на выходе из геликонного источника плазмы расположен диагностический объем. Условием просвечивания плазмы обыкновенными волнами является превышение частоты зондирующего излучения над плазменной частотой, а изменение фазы зондирующего луча отражает величину плотности плазмы [3]. В условиях установки ПН-3 плазменная частота не превышает значения 40 ГГц, поэтому для зондирования выбраны СВЧ волны с частотой в 95 ГГц.

СВЧ-интерферометр установки ПН-3 состоит из блоков синтезатора, передатчика и приемника (рис. 2). Измерение фазы проводится на промежуточной частоте (ПЧ2) 200 кГц. Частота задающего генератора ровно в 50 раз превосходит частоту ПЧ2 и составляет 10 МГц, этот сигнал также выводится для синхронизации и использования в роли опорного. Отличительной особенностью СВЧ-интерферометра установки ПН-3 является передача сигналов между блоком синтезатора и блоками передатчика и приемника по коаксиальному кабелю, что позволяет отказаться от квазиоптического оптического плеча.

Показана линейная зависимость величины средней электронной плотности плазмы от потока подаваемого рабочего газа.

Демонстрируется пороговый эффект, заключающийся в существенном росте плотности плазмы при превышении определенного значения величины магнитной индукции в области геликонной антенны. Экспериментально установлено, что магнитная конфигурация пробковой ловушки под геликонной антенной является оптимальным профилем магнитного поля, при которой наблюдается максимальное значение электронной плотности плазмы.

Работа выполнена при поддержке федерального проекта “Термоядерные и плазменные технологии”.

Список литературы

- Zhil'tsov V. A., Kulygin V. M. Fusion and Space //Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Т. 82. – №. 7. – С. 963-976.
- Takahashi K. Helicon-type radiofrequency plasma thrusters and magnetic plasma nozzles //Reviews of Modern Plasma Physics. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-61.
- Горбунов Е. П. Методика измерения средней электронной плотности в плазме на установках токамак //М.: Госатомиздат. – 1963. – С. 68.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ СБОРА ВОЛЬФРАМОВОЙ ПЫЛИ

Исследованы факторы, влияющие на скорость сбора вольфрамовой пыли электростатическим зондом. Измерены скорости сбора вольфрамовой пыли размеров 0.1 – 100 мкм электростатическим зондом, при различных подаваемых на зонд напряжениях. Установлено, что скорость сбора пыли в измеряемом временном диапазоне является постоянной величиной. Предложена теоретическая модель, описывающая наблюдаемые в ходе эксперимента процессы. Полученные результаты будут использованы в разработке модуля управления электростатическим зондом.

E.N. STANKEVICH, Y.A. SADOVSKIY, L.B. BEGRAMBEKOV
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THE FACTORS INFLUENCING THE COLLECTION RATE OF TUNGSTEN DUST

The factors influencing the collection rate of tungsten dust by an electrostatic probe have been studied. The rates of collection of tungsten dust with sizes of 0.1 – 100 μm by an electrostatic probe were measured at various voltages applied to the probe. It has been established that the rate of dust collection in the measured time range is a constant value. A theoretical model is proposed that describes the processes observed during the experiment. The results obtained will be used in the development of an electrostatic probe control module.

В строящемся международном термоядерном реакторе ITER проблема накопления пыли приобретает особое значение в связи с огромными масштабами проекта и желанием исследователей предусмотреть все возможные риски. В виду необходимости анализа пыли, образующейся в установке ITER, нашей научной группой был разработан электростатический зонд - устройство ГСП (Головка для Сбора Пыли) [1]. Одним из основных параметров ГСП является скорость сбора пыли, так как от нее зависит время работы зонда в установке ITER. Целью данной работы было измерить скорость сбора вольфрамовой пыли размеров от 0.1 до 100 мкм устройством ГСП при различных значениях подаваемого напряжения и составить теоретическую модель наблюдаемых процессов.

Скорость сбора рассчитывалась по изменению удаленной массы пыли от времени экспозиции в электростатическом поле зонда. В макет диагностической трубы, внутри которой перемещается и собирает пыль ГСП, устанавливался контейнер с вольфрамовой пылью. При этом верхний слой пыли оказывался на уровне поверхности трубы. Таким образом моделировалась ситуация удаления пыли с поверхности диагностической трубы, и при этом же обеспечивалось количество пыли для удаления, достаточное для вычисления времени его сбора. Над поверхностью пыли размещалась ГСП, на которую подавался прямоугольный импульс напряжения различной длительности. До экспозиции в электростатическом поле контейнер с вольфрамовой пылью взвешивался. По окончании сбора пыли контейнер извлекался для повторного взвешивания. Масса удаленной пыли в результате работы ГСП определялась как изменение массы контейнера. Время экспозиции варьировалось от 0.2 до 13 сек. При этом максимальное время экспозиции соответствовало моменту удаления всей пыли из контейнера. Эксперименты проводились при величинах подаваемого напряжения 5 и 10 кВ.

По полученным экспериментальным значениям рассчитаны скорости сбора пыли: $66 \pm 2 \frac{\text{мг}}{\text{с}\cdot\text{см}^2}$ (для 5 кВ), $136 \pm 11 \frac{\text{мг}}{\text{с}\cdot\text{см}^2}$ (для 10 кВ). В качестве основного фактора, определяющего скорость сбора пыли, предложена модель ограничения потока пыли ее объемным зарядом, аналогичная закону $3/2$ – ограничение тока объемным зарядом.[2-3] Применение данной теории оказывается возможным в виду постоянства значения скорости сбора пыли, являющейся одновременно и электрическим током, так как удаляемая электростатическим полем пыль заряжена. Рассчитанные по предложенной модели значения сбора близки к экспериментальным по порядку величины.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена зависимость скорость сбора от времени при постоянном напряжении, рассчитаны значения скоростей для различных напряжений и предложена теоретическая модель, призванная описать наблюдаемые в экспериментах процессы.

Список литературы

1. "Technical Specification for Dust Collection Head," 17 Jan 2019 [Online]. Available: <https://user.iter.org/?uid=WEG9TS>.
2. Павлов В.Г.// ЖТФ, 2004, т 74, вып.12, 72-79;
3. Fish, Birney Robert, "Conductive Sphere on a Charged Conductive Plane. " Master's Thesis, University of Tennessee, 1967.

А.Д. ИЗАРОВА, А.С. ПРИШВИЦЫН, Н.Е. ЕФИМОВ, А.И. АЛИЕВА, С.А. КРАТ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КОЛЬЦЕВОЙ ЛИМИТЕР ТОКАМАКА «МИФИСТ-0»

Разработана конструкция кольцевого лимитера токамака «МИФИСТ-0» с интегрированными системами измерения параметров плазменного шнура и быстросменными обращёнными к плазме тайлами. Изготовлен и откалиброван пояс Роговского. Изготовлены катушки Мирнова, снята их амплитудно-частотная характеристика.

A.D. IZAROVA, A.S. PRISHVITSYN, N.E. EFIMOV, A.I. ALIEVA, S.A. KRAT

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

RING LIMITER AT «MEPHIST-0» TOKAMAK

The design of a ring limiter for the MEPHIST-0 tokamak with integrated systems for measuring plasma column parameters and interchangeable plasma-facing tiles was developed. Rogowski coil was manufactured and calibrated. Mirnov coils were manufactured, the amplitude-frequency response was recorded.

Международный токамак ИТЭР является самым глобальным проектом, направленным на исследование термоядерного синтеза. Это будет первое термоядерное устройство, в котором планируется получить положительный выход энергии. ИТЭР позволит проводить испытания комплексных технологий и физических режимов, необходимых для коммерческого производства электроэнергии на основе термоядерного синтеза.

Участие России в проекте такого масштаба порождает острую необходимость в подготовке компетентных специалистов, способных представлять российский сектор в международных термоядерных исследованиях.

Именно это является одной из основных задач первого российского учебного токамака «МИФИСТ-0», который был создан на базе кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ в 2019 -2021 годах.

Электромагнитные (ЭМ) диагностики являются базовыми для любого токамака. С их помощью определяют ток плазмы, а также форму и расположение шнура. Чаще всего используются наборы из магнитных датчиков (катушек Мирнова), потоковых петель и поясов Роговского. На токамаке МИФИСТ-0 используются следующие электромагнитные диагностики – пояс Роговского и магнитные датчики. Для установки внутри вакуумной камеры была использована простейшая система из набора полоидальных лимитеров и креплений ЭМ диагностик, расположенных вблизи поверхности вакуумной камеры. Существующая система крепления не обеспечивает защиту от взаимодействия с плазмой в процессе разряда (что вызывает появление наводок и может привести к повреждению диагностических элементов плазмой), а также не позволяет определить точное расположение магнитных зондов, без которого невозможно достоверное определение местоположения плазменного шнура.

В настоящей работе представлена новая модель внутрикамерной системы крепления ЭМ-диагностик. Основными преимуществами перед существующей конструкцией является увеличенная механическая прочность, реализованная защита диагностических элементов от плазмы; система оснащена направляющими трубками внутри которых будут помещены магнитные зонды и пояс Роговского, что обеспечит дополнительную защиту и однозначно определённое местоположение электромагнитных диагностик. Были изготовлены новые магнитные зонды (катушки Мирнова), для них снята амплитудно-частотная характеристика. Проведена калибровка пояса Роговского.

Стоит отдельно отметить тот факт, что токамак «МИФИСТ-0» отличается простотой конструкции и небольшими размерами, ввиду чего целесообразно совместить различные элементы установки. По этой причине, новая система крепления внутрикамерных элементов будет не только служить для фиксации и защиты электромагнитных диагностик, но также будет выполнять роль лимитера. Помимо этого, была поставлена задача обеспечить возможность оперативной установки и замены разнообразных обращённых к плазме элементов и опытных образцов различных конструкций, состава и назначения. Эта задача была решена за счёт разработки быстросъёмной конструкции тайла лимитера.

Список литературы

1. Официальный сайт ИТЭР [Электронный ресурс] – URL: <https://www.iter.org/PROJ/INAFEWLINES> (дата обращения 30.11.2021)
2. Разработка проекта и модернизация малого сферического токамака для подготовки высококвалифицированных специалистов по направлению «физика плазмы» [Текст]: отчет о НИОКР (промежуточный, этап 5) / НИЯУ МИФИ; рук. Крат С.А.; исполн. Крат С.А., Пришвицын А.С. и др. – М., 2021.
3. Kirneva N.A. et al. Working area of the mephist tokamak: Preliminar estimation // Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion. 2020. Vol. 43, № 3. P. 90–100.

С.А. НОРОВ^{1,2}, Ф.О. ХАБАНОВ¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ДЕТЕКТОРНЫХ СЕТОК ОТ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПРИСТРЕЛКИ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД

Рассмотрено моделирование траекторий пучка тяжелых ионов в исследуемой области плазмы токамака Т-15МД, построение детекторных сеток с помощью пакета программ на языке Python.

S.A. NOROV^{1,2}, F.O. KHABANOV¹

¹National research center «Kurchatov institute», Moscow, Russia

²People's friendship university of Russia, Moscow, Russia

DEPENDENCE OF THE SHAPE AND SPATIAL POSITION OF DETECTOR GRIDS ON THE COORDINATES OF DECTION POINTS OF HIBP PLASMA DIAGNOSIS FOR THE T-15MD TOKAMAK

Python program visualization of heavy beam trajectories and detector lines passing through TOKAMAK for HIBP diagnostics.

Зондирование пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) – метод, использующийся для диагностики электрического потенциала в горячих областях плазмы в установках с магнитным удержанием. ЗПТИ инжектирует первичные ионы тяжелых элементов (Tl^+ , Cs^+ или Au^+) поперек магнитного поля установки и анализирует вторичные ионы (Tl^{2+} , Cs^{2+} , Au^{2+}), образовавшиеся после ионизации внутри исследуемой области плазмы. Таким образом, диагностика ЗПТИ позволяет проводить измерение электрического потенциала в исследуемой области плазмы, а следовательно и радиальное электрическое поле в горячей зоне плазменного шнура. [1,2]

Установка ЗПТИ будет использоваться на крупнейшем в России токамаке Т-15МД, запущенном в НИИЦ «Курчатовский институт». Проектирование диагностики требует предварительных расчетов поведения частиц в магнитном поле токамака. Для расчетов параметров установки ЗПТИ был использован программный комплекс, написанный на языке Python [3]. Программный комплекс включает в себя блоки для расчета и анализа траекторий пучка в плазме токамака методом Рунге-Кутты 4-го порядка, построения детекторных линий и определения размеров области исследования плазмы внутри камеры токамака.

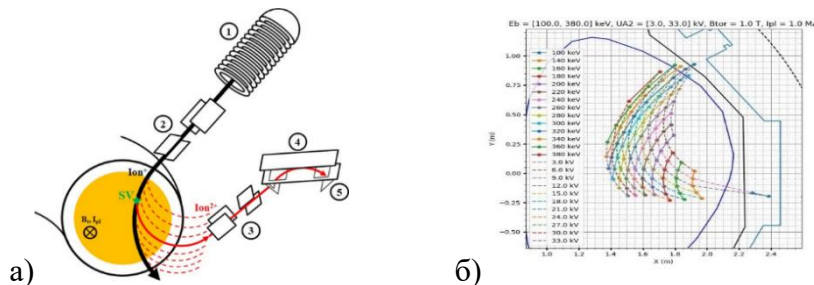


Рис. 1 а) Устройство ЗПТИ. 1 – инжектор; 2 – отклоняющие пластины первичного пучка; 3 – отклоняющие пластины вторичного пучка; 4 – анализатор; 5 – детектор; SV – область измерений б) пример рассчитанной детекторной сетки

Расчеты проводились для точек пристрелки в диапазоне $x=2.6$ м, $z=0.019$ м, $y=-0.2 : 0.015$ м с шагом 0.05 м по y . На основании проведенных вычислений получены детекторные сетки и углы вылета зондирующих частиц из камеры токамака, на основании которых будут предложены варианты расположения вторичных ионопроводов.

Список литературы

1. Melnikov A.V. et al. // Nucl. Fusion. 2017 Vol.57 №072004
2. Dnestrovskij Yu.N. et al// IEEE Trans. On plasma Science Vol.22 №4
3. Ilin A.M. et al//J.Phys.: Conf. Ser. Vol.1383 №012006

А.С. БЕЛОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, С.А. КРАТ, А.И. АЛИЕВА, Н.Е. ЕФИМОВ, А.С. ПРИШВИЦЫН,
А.П. КУЗНЕЦОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА "МИФИСТ" НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Представлена выбранная схема интерферометра для измерения линейной плотности плазмы на токамаке «МИФИСТ». Описаны схемы обработки интерферометрических сигналов. Проведена оценка ошибки измерения линейной плотности плазмы. Представлена реализация интерферометра на токамаке. Приведены интерферометрические сигналы при работе токамака.

A.S. BELOV, K.L. GUBSKY, S.A. KRAT, A.I. ALIEVA, N.E. EFIMOV, A.S. PRISHVITSYN,
A.P. KUZNETSOV

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

PLASMA ELECTRONIC DENSITY MEASUREMENT SYSTEM FOR "MEPHIST" TOKAMAK BASED ON A HETERODY INTERFEROMETER

The selected scheme of the interferometer for measuring the linear plasma density at the "MEPHIST" tokamak is presented. Schemes for processing interferometric signals are described. An estimate is made for the measurement error of the linear plasma density. An implementation of an interferometer on a tokamak is presented. The interferometric signals during the operation of the tokamak are presented.

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-0» разработан гетеродинный интерферометр на длине волны 10,6 мкм.

После запуска в рабочем режиме, в токамаке «МИФИСТ-0» ожидаются следующие параметры плазмы: электронная плотность $10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, время жизни плазмы до 30 мс [1].

Геометрия токамака позволяет реализовать режим работы интерферометра на просвет, при этом, длина диагностической хорды составляет ~ 45 см. Это означает, что при длине волны излучения 10,6 мкм фазовый сдвиг, вносимый плазмой плотностью 10^{13} см^{-3} , составляет $\sim 0,12$ радиан. Частотное смещение в интерферометре обеспечивается акустооптическим модулятором, сдвигающим излучение на частоту 40 МГц. Сигнал регистрируется CdHgTe фотодиодом, работающим при криогенных температурах. Интерферометр смонтирован на раме из немагнитных материалов и виброразвязан от несущих конструкций токамака.

Проведены испытания гетеродинного интерферометра на токамаке «МИФИСТ-0» при различных режимах установки: в состоянии покоя; с запуском всех удерживающих катушек, но без запуска рабочего газа, что препятствует образованию плазмы; при штатной работе установки. Испытания показали, что интерферометр не чувствителен к электромагнитным паводкам при работе токамака. По результатам первых экспериментов, максимально измеренная плотность плазмы составляет $7,9 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что соответствует объемной плотности плазмы $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ в предположении параболического профиля распределения плотности плазмы вдоль диагностической хорды. Максимальная погрешность измерения составляет $1,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и обусловлена главным образом шумами фотоприема и фликкер-шумом задающего генератора.

Список литературы

1. Gornostaeva O. et al. Two-color CO₂/HeNe laser interferometer for C-2 experiment // Review of Scientific Instruments. American Institute of Physics AIP, 2010. Vol. 81, № 10. P. 10D516.
2. Kurnaev V.A. et al. The Project of MEPhIST Tokamak // Physics of Atomic Nuclei, 2019. Vol. 82, № 10. P. 1329–1331

Р.О. ГАВРИЛИН, А.О. ХУРЧИЕВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, С.А. ВЫСОЦКИЙ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ, И.В. РУДСКОЙ, В.А. ВОЛКОВ, А.А. ДРОЗДОВСКИЙ, Р.П. КУЙБЕДА, П.А. ФЕДИН, С.М. САВИН, А.П. КУЗНЕЦОВ
*Национальный исследовательский центр «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. Интерес, ввиду недостатка экспериментальных данных, представляет исследование взаимодействия тяжелых ионов с энергиями от 40 до 500 кэВ/а.е.м. с сильно ионизованной низкотемпературной плазмой [1,2]. В докладе представлены результаты экспериментов по торможению ионов Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м в водородной плазме.

R.O GAVRILIN, A.O. KHURCHIEV, A.V. KANTSYREV, S.A. VISOTSKI, D.S. KOLESNIKOV,
A.A. GOLUBEV, I.V. ROUDSKOY, V.A. VOLKOV, A.A. DROZDOVSKII, A.P. KUIBEDA, P.A. FEDIN, S.M.
SAVIN, A.P. KUZNETSOV
*National Research Center «Kurchatov Institute»
Moscow, Russia.*

STOPPING POWER MEASUREMENT FOR 100 KEV/U FE IONS IN HYDROGEN PLASMA

The study of energy loss processes of heavy charged particles in plasma refers to the fundamental problems of plasma physics and physics of high energy density in matter. Investigation of heavy ions with energies in the range 40 – 500 keV/u interacting with strongly ionized plasma is of great importance because of the lack of experimental data [1,2]. Results of a stopping experiment with Fe^{+2} ions of 100 keV/u in hydrogen plasma are presented.

Для создания плазмы использована сильноточная газоразрядная мишень [3]. Данная мишень позволяет генерировать плазму с максимальной линейной плотностью свободных электронов $N_{fe} = (6.6 \pm 0.7) 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и степенью ионизации $\alpha = 0.35 \pm 0.01$. Параметры плазмы определены методом лазерной интерферометрии с квадратурной фоторегистратией [4]. Выполнены спектроскопические измерения свечения водородной плазмы сильноточного разряда с временным разрешением, которые показали, что примесные линии появляются через 10 мкс после начала разряда импульса тока и, следовательно, не влияют на процесс торможения ионов в водородной плазме в первые 1.5 мкс от начала разряда. Экспериментальная установка для определения тормозных потерь [5] создана на базе тяжелоионного линейного ускорителя ТИПр-1 в ИТЭФ. Для определения потерь энергии ионов в плазме применяется время-пролётная методика с базой 1.23 м, используется высокочастотная (27 МГц) микроструктуры ионного пучка ускорителя. В качестве детектора пучка ионов был использован сапфировый сцинтиллятор (Al_2O_3) совмещенный с фотоэлектронным умножителем. При помощи системы автоматизации сбора данных и созданного программного кода обработки были получены данные по торможению ионов в плазме для разрядного напряжения в диапазоне 2-5 кВ и начальных давлений водорода 1-4 торр. Среднее значение тормозной способности свободных электронов составило $S_{fe} = (546 \pm 45) \text{ МэВ}/(\text{мг}/\text{см}^2)$. Вклад связанных электронов был учтен исходя из ранее определенной степени ионизации плазмы.

Список литературы

1. C. Deutsch et al., The Open Plasma Physics Journal 3, 88-115, (2010);
2. R. Cheng, Y. Zhao, A. Golubev, R. Gavrillin, D. Hoffmann et al. Study of the slow ion beam penetrating the low density plasma target // Journal of Physics: Conference Series 488 092005. 2014. P.1
3. A. Golubev et.al, Nucl. Instr. An d Meth. A, V. 464, (2001), p. 247
4. A. Kuznetsov, O. Byalkovskii, K Gubskii, R. Gavrillin et.al. Plasma Physics Reports. 2013. Т. 39. № 3. С. 248-254.
5. R.O. Gavrillin et al. "Ion stopping in hydrogen plasma experiment at linear accelerator at ИТЭФ", GSI Report 2018-2, p. 34

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 18-02-00967.

Е.Ю. ТУЛУБАЕВ¹, Ю.В. ПОНКРАТОВ¹, Ю.Н. ГОРДИЕНКО¹, И.Л. ТАЖИБАЕВА¹, А.В. ВЕРТКОВ²,
М.Ю. ЖАРКОВ²

¹Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов

²АО «Красная Звезда», Москва, Россия

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИТИЕВЫХ КПС В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО И ПЛАЗМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЙ

В работе представлены результаты исследований по взаимодействию изотопов водорода с литиевой КПС в условиях облучения на реакторе ИВГ1.М в интервале температур от 200 °С до 500 °С. Описаны результаты экспериментов по испытанию литиевой КПС при взаимодействии с дейтериевой плазмой на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой (ППУ) в интервале температур от 20 °С до 1500 °С. Разработана методика подготовки экспериментов на казахстанском токамаке КТМ по воздействию плазменных нагрузок на макет литиевого дивертора, охлаждаемый мелкодисперсной смесью воды и газа с низкими значениями давления.

YE.YU. TULUBAYEV¹, YU.V. PONKRATOV¹, YU.N. GORDIENKO¹, I.L. TAZHIBAYEVA¹,
A.V. VERTKOV² M.YU. ZHARKOV²

¹Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov

²SC «Red Star», Moscow, Russia

HIGH-TEMPERATURE TESTS OF LITHIUM CPS UNDER REACTOR AND PLASMA IRRADIATION CONDITIONS

The paper presents the results of studies the hydrogen isotopes interaction with lithium CPS under the conditions of the IVG1.M reactor irradiation in the temperature range from 200 °C to 500 °C. The results of experiments on testing lithium CPS in interaction with deuterium plasma on a simulation bench with a plasma-beam installation (PBI) in the temperature range from 20 °C to 1500 °C are described. A method for preparing experiments on the effect of plasma loads on a new lithium divertor model cooled by a finely dispersed mixture of water and gas with low pressure values on the Kazakhstani KTM Tokamak was developed.

Одной из проблем развития термоядерной энергетики в настоящее время является отвод тепловых потоков удельной плотностью 10 – 20 МВт/м² при различных режимах работы термоядерного реактора. Альтернативным решением этой проблемы является использование принципиально нового обращенного к плазме материала литиевой КПС. Накопленный до настоящего времени опыт, наглядно показывает, что литиевая КПС позволяет создать долговечную, не повреждаемую и само обновляющуюся поверхность внутрикамерных элементов (ВЭ), которая не оказывает фатального воздействия на термоядерную плазму [1,2]. С целью получения данных об оптимальных режимах работы литиевого устройства в условиях реальной работы термоядерного реактора имеется необходимость полномасштабных исследований поведения литиевых КПС в условиях высоких тепловых, радиационных и плазменных нагрузок при взаимодействии с изотопами водорода.

В работе представлены результаты исследований взаимодействия изотопов водорода в температурном диапазоне от 200 °С до 500 °С с литиевой КПС в условиях облучения на реакторе ИВГ 1.М. Описаны результаты выделения трития из литиевой КПС, находящейся в твердом и жидком состоянии, в условиях реакторного излучения. Представлены результаты экспериментов по испытанию литиевой КПС при взаимодействии с дейтериевой плазмой на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой (ППУ) в интервале температур от 20 °С до 1500 °С, в соответствии с ранее отработанной методикой. Приводится сравнение результатов плазменных и реакторных экспериментов с литиевой КПС и анализ экспериментальных данных. Описана методика подготовки и проведения экспериментов на казахстанском токамаке КТМ [3] по изучению воздействия плазменных нагрузок на новый макет литиевого дивертора на базе литиевой КПС охлаждаемый мелкодисперсной смесью воды и газа с низкими значениями давления.

Работа выполняется при поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан (ИРН – BR09158585 НТП «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ»).

Список литературы

1. Mazzitelli, G., Apicella, M.L., Pericoli, V., Marinucci, M., Mazzotta, C., Tudisco, O., Lazarev, V., Alekseyev, A., Vertkov, A., Zagórski, R. FTU experimental results using a lithium liquid limiter. In: 48th APS. Philadelphia, 11 Feb. 2006. N UII.00005.
2. Hu J.S., Zuo G.Z., R. Maingi, Sun Z., K. Tritz, Xu W., Yang Q.X., D. Andruczyk, Huang M., Meng X.C., EAST teama Experiments of continuously and stably flowing lithium limiter in EAST towards a solution for the power exhaust of future fusion devices Nuclear Materials and Energy 18 (2019) 99–104.
3. Mirnov S.V., Komov A.T., Varava A.N. et al. Experimental investigation of heat transfer of highly loaded structure elements upon cooling by a two-component gas-liquid flow. — J. of Physics: Conf. Series, 2018, vol. 1128, p. 012128.

К.М. ГУТОРОВ

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, Москва, Россия
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрены аспекты разработки мощных плазменных ракетных двигателей: выбор тяговых характеристик, рабочего тела, влияние конструктивных особенностей, проблемы наземных испытаний. Приведены актуальные достижения по направлениям холловских и ионных двигателей, проекта VASIMR, магнитоплазменных двигателей и плазменных ускорителей.

K.M. GUTOROV

JSC "SRC RF TRINITY", Troitsk, Moscow, Russia
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF HIGH POWER PLASMA ROCKET THRUSTERS

Aspects of the development of powerful plasma rocket thrusters are considered: the choice of thrust characteristics, the propellant, the influence of design features, and the problems of ground tests. Current achievements in the areas of Hall and ion thrusters, the VASIMR project, magnetoplasma thrusters and plasma accelerators are presented.

В настоящее время растет доступная в космосе электрическая мощность и разрабатываются проекты ядерных реакторов для космических применений. Также не подвергается сомнению, что для осуществления транспортных операций в космосе оптимальны электрореактивные двигатели, использование которых позволяет снижать потребности массы выбрасываемого рабочего тела в десятки раз по сравнению с химическими двигателями. В этой связи разрабатываются проекты различных типов плазменных двигателей, ориентированные на мощность 200 – 300 кВт. Это пограничный уровень, который отвечает условиям целесообразности применения реактора малой мощности и допускает полноценное наземное тестирование на испытательных стендах с доступными параметрами. Также очевидны потребности кратного наращивания мощности для осуществления быстрых транспортных операций, например, пилотируемых перелетов к Марсу.

Выбор тяговых характеристик (соотношения тяги и удельного импульса) определяется потребностями космической миссии. Типичные значения удельного импульса (скорости истечения рабочего тела) плазменных двигателей находятся в диапазоне 30 – 100 км/с. Базовые параметры жестко связаны соотношением $W = \frac{dm}{dt} \frac{U^2}{2} = \frac{FU}{2}$, где W – тяговая мощность, F – тяга, U – удельный импульс, $\frac{dm}{dt}$ – расход рабочего тела. Фиксация любых двух параметров в этом выражении позволяет определить все остальные. Для ионных двигателей фиксация удельного импульса также определяет и плотность тяги $F/S = \frac{8}{3} \epsilon_0 \frac{U^2}{L^2}$, где L – расстояние между электродами, к которым приложено ускоряющее напряжение. Для холловских двигателей возможно варьирование тяги и удельного импульса при фиксированной мощности [1], однако плотность мощности остаётся относительно невысокой из-за необходимости реализации дрейфового режима движения электронов и, соответственно, относительно низкой концентрации плазмы.

Традиционно в перечисленных типах двигателей с электростатическим ускорением в качестве рабочего тела используются тяжелые благородные газы (ксенон или криптон), что существенно снижает потери на ионизацию и повышает общий КПД. При интенсивных транспортных операциях возможен дефицит этих редких газов, что побуждает рассматривать более доступные рабочие тела. Для плазмодинамических и электротермических двигателей оказывается перспективным использование аргона и более лёгких веществ (азот, литий, гелий, водород).

Наиболее близким к летным испытаниям можно считать проект мощного безэлектродного плазменного двигателя VASIMR, работы над которым продолжаются для выполнения требований NASA продемонстрировать работу в течении 100 часов на мощности 100 кВт. На ноябрь 2021 продемонстрировано 88 часов при 80 кВт и 19 минут при 100 кВт [2]. Ключевой проблемой, которая стоит перед разработчиками, является перегрев керамических изоляторов в областях ввода мощности (расположения антенн высокочастотного поля).

Для плазмодинамических систем получены данные о достижении высокой скорости истечения потока (выше 100 км/с для водорода) в квазистационарном плазменном ускорителе [3]. Высокая плотность мощности и эффективность импульсного режима позволяют рассматривать плазменный ускоритель как основу для создания прототипа плазменного двигателя, работающего в импульсно-периодическом режиме.

Список литературы

1. Tomilin D.A., Lovtsov A.S., Khmelevskoi I.A. // 36th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2019-342.
2. Matthew Giambusso, Franklin Chang Diaz, Aidan Corrigan, Lawrence Dean, Mohanad Warrayat and Martin A. Stoehr // ASCEND 2021, AIAA 2021-4150
3. Ярошевская А.Д., Малютин А.Ю., Подковыров В.Л., Гуторов К.М., Карташева А.А. // XLIX МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗВЕНИГОРОДСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ, 10.34854/ICPAF.2022.49.1.126

И.Д. ЕГОРОВ¹, Ю.С. КОРОЛЕВА¹, Д.Ф. АБДРАХМАНОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КОАКСИАЛЬНЫЙ АБЛЯЦИОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены результаты работ по созданию компактного абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД) коаксиальной конструкции с внешней магнитной системой, предназначенного для применения на нано- и микроспутниках, в первую очередь спутниках форматов CubeSat 3U и CubeSat 6U.

I.D. EGOROV¹, J.U.S. KOROLYOVA¹, D.F. ABDRAKHMANOV¹

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

COAXIAL PULSED PLASMA THRUSTER WITH EXTERNAL MAGNETIC SYSTEM FOR SMALL SATELLITES

The results of work on the creation of a compact ablative pulsed plasma thruster (μ PPT) of a coaxial design with an external magnetic system, designed for use on nano- and microsatellites, primarily satellites of the CubeSat 3U and CubeSat 6U formats, are considered.

Абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД) являются перспективным вариантом двигательных установок (ДУ) для малых космических аппаратов (МКА). Зачастую МКА являются попутной, а не основной, нагрузкой ракеты-носителя, либо доставляются грузовыми космическими кораблями на борт Международной космической станции (МКС) и запускаются в свободный полёт с неё. Это накладывает жёсткие требования к безопасности всех систем МКА, в том числе и ДУ. АИПД используют в качестве рабочего тела твёрдые диэлектрики, в основном – фторопласт, в их конструкции нет баллонов под высоким давлением, химически активных, токсичных либо пожароопасных веществ, а потому в выключенном состоянии они полностью безопасны для наземного персонала, основной нагрузки ракеты-носителя и персонала МКС.

Данный тип двигателей, как следует из названия, работает в импульсном режиме. В момент импульса питание двигателя осуществляется от конденсаторной батареи, которая заряжается от бортовой сети МКА в перерывах между импульсами. Регулируя частоту импульсов двигателя, можно регулировать потребляемую ДУ электрическую мощность. Возможны АИПД с потребляемой мощностью менее 10 Вт. Это является важным фактором ввиду малой площади, а, следовательно, и мощности, солнечных батарей, характерных для МКА.

Несмотря на описанные выше преимущества АИПД, имеется проблема уменьшения их габаритов и массы, что в первую очередь связано с необходимостью использования громоздких импульсных конденсаторов большой ёмкости [1]. При использовании конденсаторов малой ёмкости либо снижении величины разрядного тока уменьшается эффективность АИПД [1, 2]. В дополнение к этому при малом вкладе энергии в разряд и/или малом разрядном токе наблюдается науглероживание поверхности фторопластового диэлектрика, что приводит к выходу двигателя из строя, т.к. слой углерода провоцирует короткое замыкание электродов [2]. Отдельной проблемой АИПД является малая длительность разряда, в результате чего до 80% рабочего тела покидает двигатель уже после его окончания, что приводит к низкой эффективности использования рабочего тела [3]. Увеличение продолжительности разряда при сохранении величины разрядного тока потребует увеличения энергоёмкости, а с нею массы и габаритов, конденсаторной батареи.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований АИПД с коаксиальной геометрией электродов и внешней магнитной системой. Внешняя магнитная система, формируя на выходе двигателя магнитное сопло, призвана повысить эффективность его работы даже в условиях относительно низкой, не более единиц килоампер, величины разрядного тока. Магнитная система последовательно соединена с электродами двигателя и конденсаторной батареей, создавая в цепи высокое индуктивное сопротивление, тем самым увеличивая длительность разряда до величины порядка 100 мкс против единиц микросекунд, характерных для других АИПД. В качестве рабочего тела двигателя вместо традиционного фторопласта используется полиацеталь, что позволило минимизировать эффект науглероживания поверхности диэлектрика. Суммарно эти конструктивные решения позволили перейти к использованию массовых компактных плёночных конденсаторов и создать ДУ с габаритами и массой в пределах CubeSat 0,5U.

Список литературы

1. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. и др. Перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Вопросы электромеханики труды ВНИИЭМ. – Т. 133. – 2013.
2. Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А. Хрусталева М.М. Абляционный импульсный плазменный двигатель для малоразмерных космических аппаратов // Труды МАИ. – №73. – 2014.
3. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Семенихин С.А. Исследования механизмов возникновения паразитного расхода рабочего тела при работе абляционного импульсного плазменного двигателя // Космические исследования. – том 57. – № 5. – 2019.

К.М. ГУТОРОВ, А.А. КАРТАШЕВА, Н.С. КЛИМОВ, В.П. БАХТИН, Д.В. КОВАЛЕНКО,
В.Л. ПОДКОВЫРОВ, Р.В. УРЛОВА, А.Д. ЯРОШЕВСКАЯ, Е.И. МИНТУСОВ
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Приведены данные по изменению структуры плазменного потока КСПУ при добавлении внешнего продольного магнитного поля в области электродной системы ускорителя. Пространственная структура и спектры излучения плазмы регистрировались как в ускорительном канале, так и на выходе из электродной системы. Выявлено перестроение радиальной структуры потока, хотя характеристики плазмы в канале меняются слабо.

K.M. GUTOROV, A.A. KARTASHEVA, N.S. KLIMOV, V.P. BAKHTIN, D.V. KOVALENKO,
V.L. PODKOVYROV, R.V. URLOVA, A.D. YAROSHEVSKAYA, E.I. MINTUSOV
JSC "SRC RF TRINITY", Troitsk, Moscow, Russia

INFLUENCE OF A LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD ON THE FLOW STRUCTURE AND RADIATION SPECTRUM IN A PLASMA ACCELERATOR

Data are presented on the change in the structure of the QSPA plasma flow when an external longitudinal magnetic field is applied to the electrode system of the accelerator. The spatial structure and emission spectra of the plasma were recorded both in the accelerating channel and at the outlet of the electrode system. The rearrangement of the radial structure of the flow is revealed while a small change in the characteristics of the plasma in the channel is observed.

Современные расчетно-теоретические работы позволяют моделировать комплекс процессов, происходящих в канале плазменного ускорителя [1]. Для связи расчетных моделей с экспериментами на установке КСПУ [2] были проведены исследования структуры свечения разряда в ускорительном промежутке и плазменного потока на выходе из ускорителя. Для регистрации использовалась высокоскоростная камера Phantom, методика исследований представлена в работе [3]. В характерных областях разряда также регистрировались спектры излучения плазмы с применением обзорных спектрометров и спектрометра-монокроматора с высоким разрешением. Исследования были проведены как для типичной разрядной конфигурации КСПУ, так и в варианте с внешним продольным магнитным полем, создаваемым двумя катушками, расположенными снаружи анода. Величина магнитного поля варьировалась от 0,1 до 0,3 Т, что соответствует диапазону от 10 до 100% от собственного поля тока разряда.

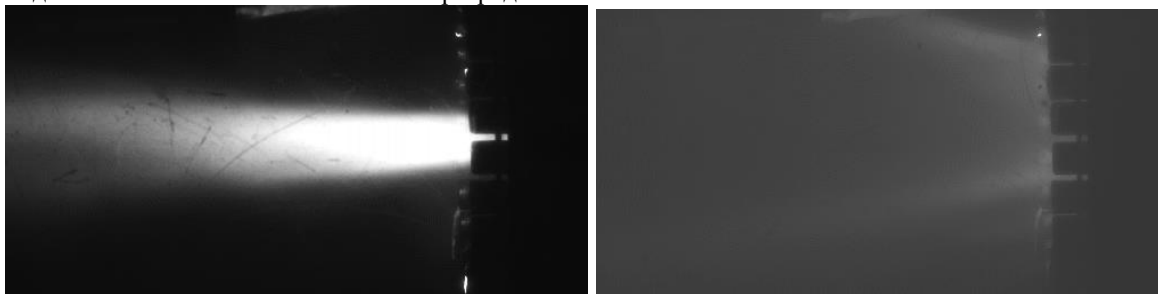


Рис. 1. Изображение потока плазмы на выходе ускорителя КСПУ без магнитного поля (слева) и с продольным полем (справа)

Изменение структуры потока на выходе приведено на рисунке 1. Видно, что с ростом магнитного поля исчезает яркая область на оси потока. Соответствующие изменения видны и в обзорных спектрах. Данное перестроение говорит об исчезновении области накопления примеси у торца катода ускорителя в режиме с магнитным полем, а также о снижении тока, текущего с катода по плазменному шнуру на торец вакуумной камеры, что подтверждается осциллограммами тока разряда.

Высокоскоростная съёмка ускорительного промежутка позволила зарегистрировать смещение фронта ионизации ближе к входу в канал при увеличении мощности разряда. Спектроскопия из этой области показывает изменение соотношения интенсивностей линий серии Бальмера вдоль канала, при этом зависимость от магнитного поля не обнаруживается.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-29-21007_мк).

Список литературы

1. Kozlov A.N., Klimov N.S., Kononov V.S., Podkovyrov V.L., Urlova R.V. // 2019. J. Phys.: Conf. Ser. 1394 012021.
2. Климов Н. С. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – №. 3. – С. 52-63.
3. Карташева А.А., Подковыров В.Л., Гуторов К.М., Васильев Г.Б., Коваленко Д.В. // XLIX МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗВЕНИГОРОДСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ, 10.34854/ICPAF.2022.49.1.126

К.М. ГУТОРОВ, А.Д. ЯРОШЕВСКАЯ, А.А. КАРТАШЕВА, Н.С. КЛИМОВ, В.П. БАХТИН,
Д.В. КОВАЛЕНКО, В.Л. ПОДКОВЫРОВ, Р.В. УРЛОВА, А.В. МЕЛЕШКО
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ТЕЧЕНИЯ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Приведены данные по влиянию продольного магнитного поля на вольтамперную характеристику ускорителя, скорость истечения потока, вкладываемую мощность и неоднородности течения. Показано, что введение магнитного поля немного снижает ток и повышает разрядное напряжение, снижает величину неоднородностей потока. Зарегистрирован характерная величина тока перестроения режима разряда.

K.M. GUTOROV, A.D. YAROSHEVSKAYA, A.A. KARTASHEVA, N.S. KLIMOV, V.P. BAKHTIN, D.V.
KOVALENKO, V.L. PODKOVYROV, R.V. URLOVA, A.V. MELESHKO
JSC "SRC RF TRINITY", Troitsk, Moscow, Russia

INFLUENCE OF A LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD ON THE STABILITY OF THE FLOW AND INTEGRAL CHARACTERISTICS IN A PLASMA ACCELERATOR

Data are presented on the effect of a longitudinal magnetic field on the current-voltage characteristic of the accelerator, the flow velocity, the input power, and the structure of flow inhomogeneities. It is shown that the introduction of a magnetic field slightly reduces the current and increases the discharge voltage, reduces the magnitude of flow inhomogeneities. The characteristic current of the discharge regime alteration was registered.

Расчетно-теоретические работы по моделированию ускорительного канала КСПУ показывают, что введение дополнительного магнитного поля положительно влияет на устойчивость разряда в определенных условиях [1]. В связи с этим на установке КСПУ [2] была проведена серия экспериментов, направленных на исследование интегральных характеристик и неустойчивостей течения. Диапазон варьирования магнитного поля был расширен в сторону увеличения от 10% до 100% по отношению к собственному магнитному полю тока разряда.

Показано, что введение поля снижает разрядный ток на 10%, при этом мощность сохраняется за счет увеличения напряжения и указанный эффект не зависит от величины магнитного поля в исследованном диапазоне (рис. 1). При работе на водороде были получены ВАХ ускорителя в диапазоне токов от 70 до 180 кА, демонстрирующие «кризис тока» при 120 кА, проявляющийся в постоянстве тока при росте напряжения. Однако, дальнейшее повышение мощности приводит к изменениям в поведении разряда, что сопровождается дальнейшим ростом тока и наблюдается как перелом на ВАХ. В условиях эксперимента магнитное поле не повлияло на это явление существенным образом.

Добавление магнитного поля приводит к снижению скорости потока плазмы (в соответствии со снижением тока разряда) и к снижению величины неоднородностей в потоке.

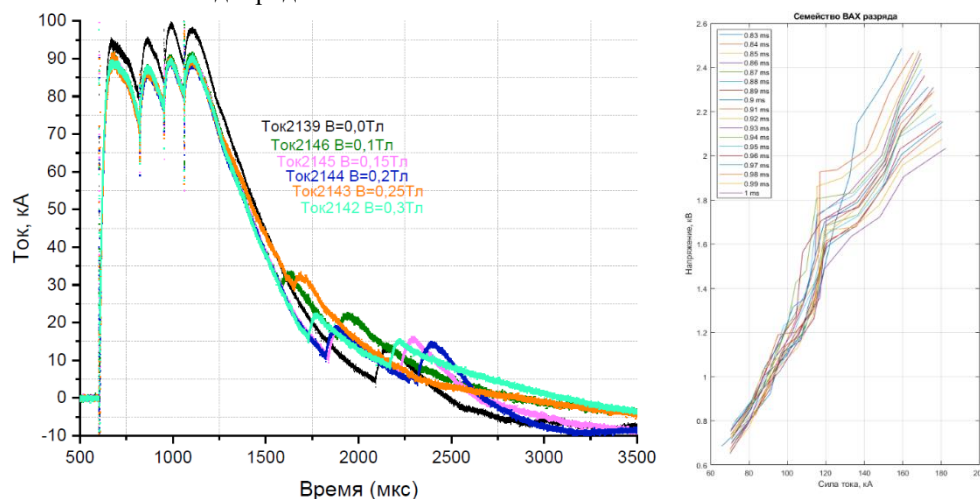


Рис. 1. Влияние магнитного поля на ток разряда (слева) и ВАХ разряда с заметным переломом при 120 кА (справа)
Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-29-21007_мк).

Список литературы

1. Козлов А.Н. // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 3. – С. 44-55.
2. Климов Н. С. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – № 3. – С. 52-63.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ

Рассмотрена система регистрации импульсного воздействия, состоящая из баллистического маятника и датчиков перемещения, силы и ускорения. Проведен анализ амплитудно-частотных и импульсных характеристик измерительных каналов. Представлены результаты испытания системы регистрации на основе трёхкоординатного сейсмоприемника ZET 048-C.

F.A. BELOLUTSKIY, T.V. KAZIEVA, A.A. MOROZOV, V.N. RESHETOV, M.V. RESHETOVA

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

ANALYSIS OF A DETECTION SYSTEM FOR THE IMPACT FORCE OF A GAS JET

A detection system for impulse force that consists of a ballistic pendulum, coupled with displacement, force, and acceleration sensors is considered. Analysis of frequency and impulse responses for its measurement channels is conducted. Finally, testing results for a detection system based on a three-axis seismograph ZET 048-C are presented.

Схематическое изображение измерителя силы воздействия представлено на рис. 1а. Инертная масса баллистического маятника разбита на две части m_1 и m_2 , соединенные между собой тремя датчиками силы, расположенными по кругу. Датчик ускорения размещён на ловителе газовой струи массой m_2 и позволяет измерять высокочастотные составляющие силы воздействия. Была собрана и испытана упрощенная система регистрации импульсного воздействия, состоящая из трёхкоординатного сейсмоприемника ZET 048-C, подвешенного в виде маятника [1]. Импульсное воздействие имитировалось путем бросания в сейсмоприемник мягких протяжённых объектов. Зарегистрированные ускорения для различных по длительности воздействий представлены на рис. 1б.

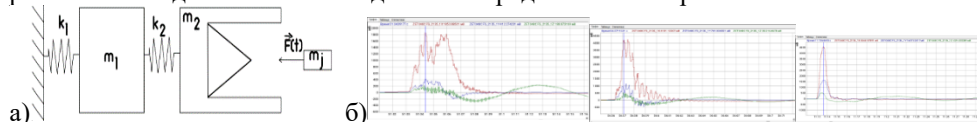


Рис. 1. Блок-схема гибридного баллистического маятника и примеры зарегистрированных акселерометром сигналов.

Если период ($T_1=1/f_1$) резонансных колебаний инертной массы системы регистрации много больше длительности импульса силы, то выполняются условия баллистичности маятника и в диапазоне частот от f_1 до f_2 датчики силы измеряют силу воздействия газовой струи, умноженную на $m_1/(m_1+m_2)$. Для длительности импульса силы менее 10 мс резонансная частота пружинного подвеса инертной массы может быть 10 Гц. При этом ошибка в измерении интегрального импульса силы не превысит 1%. Резонансная частота f_2 отвечает собственным колебаниям двух масс m_1 и m_2 , соединенных датчиками силы с суммарной жесткостью k_2 . Если $m_1 \gg m_2 \gg m_s$, где m_s — эффективная масса датчика, то резонансная частота f_2 будет в $(m_2/m_s)^{0.5}$ раз меньше паспортного значения резонансной частоты датчика силы. При использовании трёх датчиков силы РСВ Piezotronics 208C05 с жесткостью 10^9 Н/м и массе ловителя газовой струи 3кг резонансная частота f_2 будет примерно 5кГц. Плоский участок амплитудно-частотной характеристики датчика силы будет находиться между f_1 и f_2 с явно выраженными резонансами на этих частотах. Масса ловителя внешнего воздействия m_2 должна быть минимальна. В этом случае происходит расширение частотного диапазона датчика силы и возможно корректное измерение силы внешнего воздействия в большем частотном диапазоне [2].

Данный канал наиболее информативен в плане изучения временной зависимости силы воздействия, поскольку его АЧХ начинается с единиц Гц (f_1) и простирается до единиц кГц (f_2), ниже и выше этих частот АЧХ резко спадает. Высокая добротность механического резонанса данного канала будет искажать спектр пульсаций силы, и для корректного анализа данных нужны экспериментальные исследования переходной, импульсной или АЧХ и ФЧХ данного измерительного канала.

Канал регистрации, ассоциированный с трёхкоординатным акселерометром, установленным на первичной массе m_2 ловителя силы, имеет сложную АЧХ, состоящую из двух плоских участков [2]. На частотах ниже f_2 измеряемое им ускорение следует относить к общей массе (m_1+m_2), выше f_2 к m_2 . Резонанс f_2 , как и собственная резонансная частота датчика f_a , внесут соответствующие коррективы в его отклик. В высокочастотной области кроме собственного резонанса акселерометра f_a будут проявляться резонансы элементов конструкции и поэтому крайне важно, чтобы они отсутствовали или имели собственные частоты существенно выше частот пульсаций силового воздействия. При использовании акселерометра AP1080 ГлобалТест рабочий диапазоном частот данного измерительного канала гибридной системы регистрации будет от 0,5 Гц до 20 кГц.

Проведенный анализ показывает возможность регистрации как интегральной величины импульса силы, так и её временной зависимости с разрешением не хуже 0,1 мс с помощью рассматриваемой гибридной системы измерения динамического воздействия, содержащей быстродействующие датчики силы и ускорения. При этом входящий в состав системы датчик перемещения, позволяющий измерять как амплитуду свободных колебаний, так и скорость, приобремененную инертной массой к концу силового воздействия, позволяет верифицировать информацию с каналов регистрации силы и ускорения, путем интегрирования зарегистрированных временных зависимостей с учетом АЧХ трактов регистрации силы и ускорения. Полученные аналитические результаты сопоставлены с данными численного моделирования системы регистрации силового воздействия.

Список литературы

1. Патент на изобретение: Баллистический маятник, RU 2672897 C1, <https://patents.google.com/patent/RU2672897C1/ru>.
2. Гимпильевич Ю.Б., Чокон П.В., Анализ частотных и временных характеристик колебательного звена четвёртого порядка: Вестник СевГТУ, Информатика, электроника, связь, Выпуск (31), 2000.

Д.Б. ЗОЛОТУХИН, Е.М. ОКС, А.В. ТЮНЬКОВ, Ю.Г. ЮШКОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

ПРОГРЕСС В ИЗУЧЕНИИ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

Приведены обобщающие результаты изучения особенностей генерации пучковой плазмы непрерывным пучком электронов в форвакуумной области давлений (единицы – десятки Паскаль). Обсуждаются условия образования и параметры плазмы при электронно-лучевом воздействии на диэлектрическую мишень, инъекции пучка в диэлектрическую полость, в том числе при инициации в полости пучково-плазменного разряда, а также при пучково-плазменном азотировании мишени.

D.B. ZOLOTUKHIN, E.M. OKS, A.V. TYUNKOV, YU.G. YUSHKOV

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

PROGRESS IN RESEARCH OF GENERATION FEATURES OF BEAM PLASMA IN FORE-VACUUM PRESSURE RANGE

We discuss the generalized and updated research results on features of generation of beam plasma by a continuous electron beam in fore-vacuum pressure range (units – tens of Pascals). The conditions for formation and parameters of beam plasma under electron-beam treatment of a dielectric target, as well as the beam injection inside a dielectric cavity, including initiation of beam-plasma discharge in the cavity, and beam-plasma nitriding of the target, are discussed.

Особенностью форвакуумного диапазона давлений (1-100 Па) рабочего газа является тот факт, что при распространении электронного пучка в газе происходит формирование плотной пучковой плазмы, концентрация заряженных частиц в которой многократно превышает концентрацию электронов в пучке. Генерация пучковой плазмы обеспечивает практически полную нейтрализацию зарядки электронным пучком электрически непроводящей поверхности, и тем самым делает возможным непосредственную электронно-лучевую модификацию диэлектрических материалов.

Взаимодействие электронов пучка и потоков заряженных частиц из пучковой плазмы с поверхностью облучаемой пучком диэлектрической мишени приводит к возникновению физических эффектов, оказывающих влияние как на пучково-плазменную обработку материалов, так и на параметры и характеристики самой пучковой плазмы. Так, при испарении в инертном газе с высоким потенциалом ионизации (гелии) вещества с низким потенциалом ионизации (медь), отмечена нелинейность зависимости температуры электронов от плотности мощности пучка [1]. Электронно-лучевое облучение диэлектриков в форвакууме приводит к формированию на их поверхности отрицательного потенциала, прямое измерение которого затруднено и для измерения которого предложено ряд методов [2, 3]. Установлено, что при инъекции пучка в диэлектрическую полость, генерируемая внутри полости пучковая плазма имеет более высокую концентрацию и электронную температуру [4]; дальнейшее повышение параметров плазмы в полости возможно благодаря инициации пучково-плазменного разряда [5]. При электронно-лучевом азотировании титана, зафиксированное многократное увеличение содержания ионов атомарного азота в плазме электронного пучка в области обрабатываемого образца с ростом давления, в то время как возможность контроля степени нагрева образца удержанием плотности мощности пучка позволяет эффективно азотировать различные виды сталей и металлов [6].

Таким образом, в форвакуумной области давлений экспериментально исследован и проанализирован ряд физических эффектов, сопровождающих генерацию многокомпонентной пучковой плазмы при электронно-лучевом облучении диэлектрической мишени, а также при инъекции электронного пучка в диэлектрическую полость. Эти эффекты расширяют номенклатуру доступных методов пучково-плазменной модификации диэлектрических материалов.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2021-0013.

Список литературы

1. D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E. Oks, A.V. Tyunkov, Yu. G. Yushkov // Phys. Plasmas 2019. V. 26, № 5. P. 053512.
2. D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30, № 8. P. 085010.
3. D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // Phys. Plasmas. 2017. V. 24, №9. P. 093502.
4. D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. V. 25, № 1. P. 015001.
5. D.B. Zolotukhin, M.I. Lomaev, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28, № 3, P. 035018.
6. V.A. Burdovitsin, D.A. Golosov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin, S.M. Zavadsky // Surface & Coatings Technology. 2019. V. 358, P. 726–731.

К.С. НОВИКОВА¹, В.В. КРАВЧЕНКО¹, Д.П. КНЯЖЕВ¹,
Д.Д. БЕРНТ^{1,2}, А.А. ПИСАРЕВ²

¹АО «Октогласс», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОЗРАЧНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОКСИДНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ МОДУЛЕЙ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА, ПРИ ИХ ОКРАШИВАНИИ

Рассмотрены процессы, влияющие на омические потери напряжения на границе реакционно осажденных из плазмы магнетронного разряда тонкопленочных оксидных FTO электродов и полимерного электролита внутри ячеек электрохромных устройств. Выявлена зависимость регистрируемого полного омического сопротивления устройства от величины совокупного накопленного в ходе его окрашивания заряда. Проведена оценка влияния площади устройства на вклад в его полное омическое сопротивление от сопротивления непосредственно тонкопленочных оксидных электродов. Предположение о присутствии случайного количества носителей заряда ЭХУ на поверхности его электродов в начальный момент процесса окрашивания, также привносящего вклад в начальное омическое сопротивление устройства, подтверждено посредством независимой импедансной спектроскопии электролитического слоя.

K.S. NOVIKOVA¹, V.V. KRAVCHENKO¹, D.P. KNYAZHEV¹,

D.D. BERNT^{1,2}, A.A. PISAREV²

¹“Octoglass” JSC, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

OHMIC LOSSES ON MAGNETRON-SPUTTERED PVD THIN-FILM TCO ELECTRODES OF THE ELECTROCHROMIC MODULES DURING THEIR TINTING

The processes influencing on the ohmic losses at the border between the reactively magnetron-sputter deposited thin film oxide FTO electrodes and the polymer electrolyte within the cell of an electrochromic device are considered. The function of the registered full ohmic resistance of the device from the total electrical charge collected during the tinting process is established. The influence of the surface area of the device on the contribution to its total ohmic resistance from the resistance of directly the thin-film oxide electrodes is estimated. The assumption about the presence of a random number of ECD charge carriers on the surface of its electrodes at the initial moment of the coloring process, which also contributes to the initial ohmic resistance of the device, was confirmed by independent impedance spectroscopy of the electrolytic layer.

Электрохромные устройства (ЭХУ) – системы, изменяющие интегральную интенсивность пропускания излучения определенного диапазона длин волн под действием прикладываемого напряжения. Распространенной конструкцией ЭХУ является многослойная тонкопленочная структура, переключение состояния которой происходит за счет интеркаляции носителей заряда между двумя электродными слоями через электролит, а часто применяемым материалом прозрачного электрода токоведения служит пленка F-легированного оксида олова SnO₂:F (FTO) [1], как правило осаждаемого реакционным распылением мишени в Ag+O₂ плазме магнетронного разряда [2].

Одной из проблем эксплуатации ЭХУ является риск превышения redox-потенциала полимерных компонент системы, приводящего к необратимой деградации качеств окрашивания. Также, поддержание наибольшего допустимого управляющего напряжения обеспечивает наивысшую скорость окрашивания. В результате, необходимо иметь возможность учитывать падение потенциала от источника питания ЭХУ на границе полимерных слоев с неорганическими электродами в ходе окрашивания.

Потенциостатическая оценка омического сопротивления ячейки ЭХУ в ходе окрашивания выявила рост величины с выходом на насыщение при полном окрашивании ЭХУ. Было обнаружено, что начальное сопротивление ЭХУ зависит от площади поверхности его электродных слоев. Предположение, что это является следствием изменения параметров осаждения электродных пленок и горения разряда с изменением размеров подложки не было подтверждено в ходе дополнительной серии экспериментов.

В свою очередь, предположения о том, что наиболее заметный вклад в совокупное сопротивление ЭХУ вносится омическими потерями на границе между электродным и электролитическим слоями, зависящими от накопленного в ходе окрашивания заряда на электроде, а также о присутствии на электродах носителей заряда в начальный момент времени, количество которых прямо пропорционально площади поверхности электродов, были подтверждены независимой импедансной спектроскопией электролитического слоя. Так, было выявлено, что сопротивление на границе электродных пленок примерно в 200 раз превышает сопротивление в толще электролитического слоя. Установленные зависимости позволили сократить длительность окрашивания исследуемых ЭХУ на 18% без снижения их циклической стабильности.

Список литературы

1. Bange K., Gambke T. // *Advanced Materials*. 1990. V. 2. P. 10-16.
2. Ellmer K. // *J. Appl. Phys.* 2000. V.33. P.17-32

Г.Д. ЛИЗИЯКИН¹, Н.Н. АНТОНОВ¹, А.В. ГАВРИКОВ¹, А.Д. МЕЛЬНИКОВ¹, А.П. ОЙЛЕР^{1,2},
В.П. СМОРНОВ¹, Р.А. ТИМИРХАНОВ¹, Р.А. УСМАНОВ¹, Л.С. ВОЛКОВ^{1,2}, Н.А. ВОРОНА¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

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

ПЛАЗМЕННАЯ МАСС-СЕПАРАЦИЯ В КОНФИГУРАЦИИ С ЛИНЕЙНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМОЙ

Представлены последние экспериментальные результаты, полученные на плазменном масс сепараторе ЛаПлаС. В основе схемы сепарации продольное однородное магнитное поле и радиальное электрическое поле. Продемонстрировано разделение модельной смеси Pb-Ag на компоненты.

G.D. LIZIAKIN¹, N.N. ANTONOV¹, A.V. GAVRIKOV¹, A.D. MELNIKOV^{1,2}, A.P. OILER^{1,2}, V.P. SMIRNOV¹,
R.A. TIMIRKHOV¹, R.A. USMANOV¹, L.S. VOLKOV^{1,2}, N.A. VORONA¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

PLASMA MASS SEPARATION IN CONFIGURATION WITH LINEAR POTENTIAL WELL

The latest experimental results obtained at the LaPlaS plasma mass separator are presented. The separation scheme is based on a longitudinal uniform magnetic field and a radial electric field. The separation of a model Pb-Ag mixture into components is demonstrated.

Один из ключевых вызовов для атомной энергетики является проблема замыкания ядерного топливного цикла. Замкнутый цикл подразумевает минимизацию захороняемых отходов. Для такой минимизации необходима технология переработки отработавшего топлива. Применение методов плазменной сепарации, в том числе, возможно и на этапе отделения минорных актиноидов от лантанидов т.к. эти группы элементов близки по химическим свойствам и поэтому трудно отделяются химическими методами.

В основе плазменным методом разделения веществ по массам лежит идея о транспорте заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, погруженных в плазму. Наличие плазмы в транспортирующей системе гарантирует компенсацию объемного заряда и, следовательно, повышает производительность устройства.

В настоящей работе представлены последние экспериментальные данные по плазменному разделению компонентов смеси на установке ЛаПлаС [1]. В качестве смеси моделирующей актиноиды и продукты деления выступает смесь свинца (Pb) и серебра (Ag). Ионизованная смесь покидая источник плазмы попадает в действие радиального электрического поля буферной плазмы. В качестве буферной плазмы выступает отражательный разряд с термокатодом. Характерные параметры разряда – ток 10 А, напряжение -550 В. Разделенные в пространстве компоненты смеси оседают на подложку, расположенную вдоль азимутальной координаты цилиндра. На рисунке 1 представлено распределение компонентов смеси на подложке. Из рисунка видно, что характерное значение обогащения продукта составляет порядка 3, а расстояние между максимумами распределений компонентов смеси 14 см.

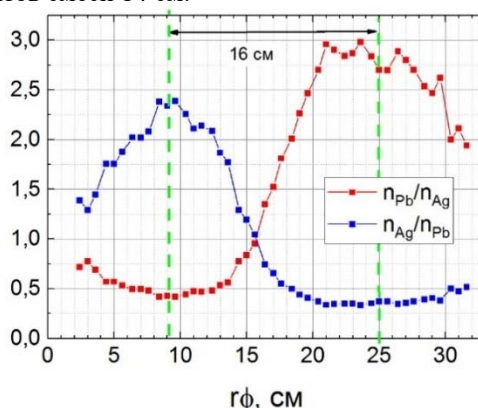


Рис. 1. Распределение компонентного состава Pb-Ag смеси на поверхности подложки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-19-00716, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00716/>

Список литературы

1. Liziakin G., Antonov N., Smirnov V.S., Timirkhanov R., Oiler A., Usmanov R., Melnikov A., Vorona N., Kislenko S., Gavrikov A. and Smirnov V.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021, V. 54, P. 414005

И.А. СОРОКИН, Д.В. КОЛОДКО

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОДАЧЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Эффект полого катода между двумя параллельными пластинами сохраняется при подаче на одну из них дополнительного напряжения смещения относительно напряжения разряда (в узком диапазоне рабочих давлений для геометрии разрядного промежутка). Несимметричная подача напряжения в разряде с полым катодом приводит к значительному увеличению скорости распыления катода с большим значением потенциала, что связано как с увеличением плотности плазмы, так и с увеличением коэффициента распыления материала мишени. В работе описана система распыления, реализованная на этом принципе.

I.A. SOROKIN, D.V. KOLODKO

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch), Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

PLANAR HOLLOW CATHODE SPUTTERING WITH ASYMMETRICAL VOLTAGE SUPPLY

The hollow cathode effect between two parallel plates is preserved when a high voltage bias is applied to one (in a narrow range of operating pressures for the discharge gap geometry). The asymmetrical voltage supply in hollow cathode sputtering leads to a significant increase in the sputtering rate, which is associated with both an increase in the plasma density and an increase in the sputtering coefficient of the target material. The paper describes the sputtering system implemented on this principle.

В работе описывается возможность создания плазменной распылительной системы на базе плоскопараллельного разряда с полым катодом (РПК) [1-3] с асимметричной подачей напряжения. Экспериментально показано, что дополнительное смещение на один из катодов РПК (мишень) значительно уменьшает значение напряжения перехода аномального тлеющего разряда в разряд с полым катодом. При этом эффект полого катода сохраняется в достаточно узком диапазоне рабочих давлений, характерном для заданной геометрии разрядного промежутка. Эффективность предлагаемого подхода была оценена в рамках измерения скорости осаждения тонкой железной пленки с помощью прототипа распылительной системы с плоскопараллельными сеточным электродом и мишенью. На рисунке 1 представлена фотография прототипа распылительной системы на базе РПК с дополнительным смещением мишени в процессе осаждения железа на Мо подложку.



Рисунок 1. РПК в процессе осаждения Fe пленки на Мо подложку

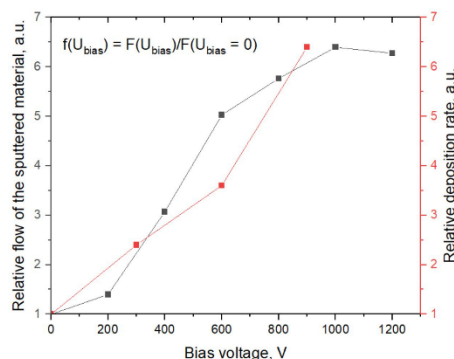


Рисунок 2. Зависимости относительного потока распыленного материала и относительной скорости осаждения железа от величины дополнительного напряжения смещения

При рабочем давлении 40 Па, напряжении основного разряда – 600 В, расстояниях между электродами и до подложки – 7 и 40 мм, соответственно, скорость осаждения железа увеличивается от 2 нм/мин – для режима классического РПК до 16 нм/мин. – при напряжении смещения мишени - 900 В. С помощью зондовой диагностики локальных параметров плазмы РПК было показано, что значительный рост скорости осаждения является совокупным эффектом увеличения коэффициента распыления мишени и величин основных параметров плазмы (плотность и температура электронов). Результат сравнения зависимости относительного потока распыленного материала и относительной скорости осаждения железа от дополнительного напряжения смещения на мишень показан на рисунке 2. Дальнейшее развитие данного подхода позволит создавать эффективные масштабируемые распылительные системы разной геометрии (плоской, цилиндрической и сферической).

Список литературы

1. Muhl S., Pérez A. // Thin Solid Films. 1985. V. 579, P. 174-198.
2. Kolobov V.I., Metel A.S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48 P. 233001.
3. Metel A., Bolbukov V., Volosova M., Grigoriev S., Melnik, Y // Surface and Coatings Technology. 2013. V. 225. P. 34-39.

И.А. СОРОКИН^{1,2}, Ф.С. ПОДОЛЯКО²

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА МЕЖДУ ПЛАЗМОЙ И ВЫСОКОЭМИССИОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассматривается упрощенная модель формирования N-образной вольтамперной характеристики электрода с высокой вторично-эмиссионной способностью поверхности, контактирующей с плазмой, содержащей высокоэнергетичные группы электронов. Представлены некоторые результаты численного моделирования автоколебательной разрядной системы, возникающей в процессе развития вторично-эмиссионной неустойчивости протекания тока через плазменно-поверхностный контакт, на основании модельных N-образных ВАХ.

I.A. SOROKIN^{1,2}, F.S. PODOLYAKO²

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch), Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia

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

NUMERICAL SIMULATION OF INSTABILITY OF CURRENT FLOW BETWEEN A PLASMA AND A HIGH-EMISSION SURFACE

A simple model of the N-shaped IV-curve formation of an electrode with a high secondary emission capacity of the contact surface with a plasma containing high-energy electrons was considered. Some results of numerical simulation of an auto-oscillatory discharge system forming during the development of secondary emission instability of current flow through a plasma-surface contact, based on model N-shaped IV-curve, were presented.

Возникновение на поверхности металла тунельнотонких диэлектрических покрытий может приводить к возникновению неустойчивости плазменно-поверхностного взаимодействия по вторично-эмиссионному механизму в некоторых типах газового разряда (пучково-плазменный разряд, магнетронный разряд, разряд с полым катодом и т.д.). При наличии высокоэнергетичных групп электронов в плазме возникающая N-образная вольтамперная характеристика [1] с областью отрицательного дифференциального сопротивления подобного рода электродов создает благоприятные условия для усиления и генерации автоколебаний на собственных частотах образованного электрического контура [1-3]. Формирование устойчивой самосогласованной динамической системы токового обмена между плазмой и высокоэмиссионной поверхностью изолированного проводника рассматривается как отдельный тип разряда – автоколебательный вторично-эмиссионный разряд (АВЭР).

В работе предлагается качественный численный метод, описывающий формирование мгновенной N-образной вольтамперной характеристики электрода с тонкой диэлектрической пленкой на поверхности. На рисунке 1 представлена схема используемой модели баланса токов на поверхности высокоэмиссионного электрода.

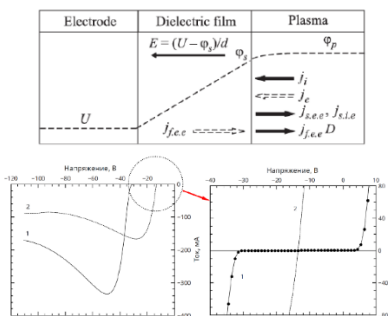


Рисунок 1. Модель формирования мгновенной N-образной ВАХ и характерный вид модельной ВАХ.

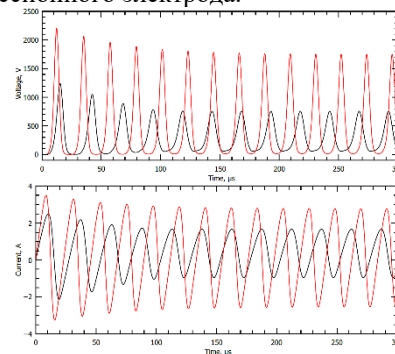


Рисунок 2. Осциллограммы напряжения и тока в АВЭР.

На основании модельных ВАХ рассчитывается поведение автоколебательной динамической системы полученного электрического контура и рассматривается формирование устойчивого режима колебаний для различных значений внешних элементов цепи (RLC блока питания и подводящих проводов), а также параметров пленки и параметров высокоэнергетичной группы электронов. На рисунке 2 показаны примеры осциллограмм напряжения и тока в процессе развития АВЭР. Предложено упрощенное описание динамики изменения параметров автоколебаний в соответствии с изменением мгновенной ВАХ. Модельные результаты качественно описывают наблюдаемые в эксперименте типы автоколебаний.

Список литературы

1. Gutorov K.M., Vizgalov I.V., Sorokin I.A., Podolyako F.S. // JETP Letters. 2015. V. 100. № 11. P. 708-711.
2. Gutorov K.M., Vizgalov I.V., Kurnaev V.A. // Plasma Physics Reports. 2012. V. 38. № 13. P. 1050-1052.
3. Vizgalov I.V., Gutorov K.M., Kurnaev V.A., Sorokin I.A. // Physics of Atomic Nuclei. 2019. V. 82. № 10. P. 1368-1375.

В.В. КУЗЕНОВ^{1,2}, П.Д. БРОСИН¹

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

² *ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе математического моделирования физических процессов (с учетом теплофизических свойств неидеальной плазмы) в электроразрядных источниках ведется разработка научно-технических основ функционирования компактных источников излучения и импульсных струй плазмы на основе линейно-стабилизированного разряда и магнитоплазменного компрессора.

V.V. KUZENOV^{1,2}, P.D. BROSIN¹

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

² *Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia*

MATHEMATICAL MODEL OF PHYSICAL PROCESSES IN ELECTRIC DISCHARGE SYSTEMS FOR THE CREATION OF COMPACT RADIATION SOURCES

On the basis of mathematical modeling of physical processes (taking into account the thermophysical properties of nonideal plasma) in electric discharge sources, the development of scientific and technical foundations of the functioning of compact radiation sources and pulsed plasma jets based on a linearly stabilized discharge and a magnetoplasma compressor is carried out.

Наиболее перспективным направлением создания мощных источников излучения с омическим нагревом, удовлетворяющих требованиям многих практических и научных приложений, является использование открытых поверхностных сильнооточных излучающих разрядов в газах. В эту группу входят разряды, плазменные образования которых формируются над цилиндрической или плоской поверхностью неразрушаемого диэлектрика, которая является не только плазмообразующим веществом, но и в ряде случаев (например, линейно-стабилизированный поверхностный разряд в плотных газах) выполняет функцию необходимого конструктивного элемента, ответственного за инициирование разряда.

Улучшение физико-технических характеристик компактных источников излучения и импульсных струй плазмы является объектом исследования для ученых в течение последнего десятилетия. Междисциплинарность исследования заключается в комплексном исследовании физических процессов в плазме разряда на основе теоретических моделей и методик численного эксперимента с применением известных экспериментальных данных, анализе и прогнозировании развития соответствующей техники и технологий [1-10].

Предпосылки эффективного использования схем с мощными источниками излучения обусловлены успехами экспериментов; теоретические и расчетные исследования базируются на весьма упрощенных методиках. Поэтому необходимы новые, более детальные физические модели и многоуровневые вычислительные модели, в т.ч. развитие существующих моделей учитывающих пространственную структуру струй, реальные уравнения состояния, теплообмена излучением и другие радиационно-плазодинамические процессы. Главная особенность данной работы заключается в возможности создания на основе выполненных исследований экспериментальных образцов портативных источников излучения и импульсных струй плазмы с рекордными характеристиками для использования для объектов атомной энергетики, повышение эффективности добычи углеводородного сырья и других сфер применения [8-15].

Список литературы

1. Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A. // *Fusion Science and Technology*. 2003. V. 43. № 1Т. P. 304–308.
2. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Journal of Phys.: Conf. Series*. 2017. V. 830. P. 012124.
3. Кузенов В.В. // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2016. Т. 7, № 4. С. 342–346.
4. Ryzhkov S.V. // *Fusion Science and Technology*. 2005. V. 47. № 2Т. P. 342–344.
5. Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. // **ZAMP**. 2019. V. 70. P. 46.
6. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 830. P. 012049.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Journal of Phys.: Conf. Series*. 2017. V. 815. P. 012024.
8. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Shumaev V. V. // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2015. No. 1 (95). P. 97-99.
9. Клименко Г.К., Кузенов В.В., Ляпин А.А., Рыжков С.В. Учебник: Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 264 с.
10. Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. *Alternative Fusion Fuels and Systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. 200 p.
11. Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., et al. // *Plasma Physics Reports*. 2012. V. 38. P. 1025-1031.
12. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Physics of Plasmas*. 2019. V. 26. P. 092704.
13. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Gavrilova A.Yu., Skorokhod E.P. // *High Temperature Material Processes*. 2014. V. 18. P.119-130.
14. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Radiation-hydrodynamic modeling of the contact boundary of the plasma target placed in an external magnetic field // *Applied Physics*. 2014. № 3. P. 26-30.
15. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Russian J. Nonlinear Dynamics*. 2019. V. 15, 4. P. 543-550.

В.П. АФАНАСЬЕВ¹, Л.Г. ЛОБАНОВА¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА МЕТОДОМ ИНВАРИАНТНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

Построена аналитическая теория формирования угловых распределений и энергетических спектров отраженных легких ионов термоядерных энергий. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных указывает на адекватность представленной теории анализируемым процессам.

V.P. AFANAS'EV¹, L.G. LOBANOVA¹

¹ National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute), Moscow, Russia

ANALYSIS OF THE PROCESSES OF INTERACTION OF LIGHT IONS WITH CONSTRUCTION MATERIALS BASED ON THE ANALYTICAL SOLUTION OF THE BOUNDARY PROBLEM FOR THE TRANSPORT EQUATION BY THE INVARIANT IMBEDDING METHOD

An analytical theory of the formation of angular distributions and energy spectra of light ions of thermonuclear energy reflected from solids is constructed. Comparison of calculated and experimental results indicates the adequacy of the presented theory to the analyzed processes.

В соответствии с гипотезой Ферми возможно разделение процессов взаимодействия быстрых легких ионов, движущихся в твердых телах, на два независимых канала – упругое и неупругое рассеяние. Тогда угловые распределения и энергетические спектры представимы в виде сверткой решений упругой и неупругой задач:

$$R(\Delta, \mu_0, \mu) = \int_0^{\infty} dz \cdot R_{el}(z, \mu_0, \mu) T_{in}(z, \Delta) \quad (1)$$

Решение упругой задачи строится на основе малоуглового приближения метода инвариантного погружения [1,2] или ОКГ приближения [2,3], хорошо апробированного в задачах электронного рассеяния. Малоугловое приближение подразумевает малость отношения:

$$\zeta = \frac{x(\pi)}{x(0)} \ll 1 \quad (2)$$

где $x(\theta)$ – нормированное на единицу сечение упругого рассеяния частиц на угол θ . Следует отметить, что для ионов неравенство (2) справедливо в более широком интервале энергий, чем для электронов.

Уравнение, описывающее плотность потока частиц, отразившихся от мишени, пройдя в ней путь s , записанное в малоугловом приближении, имеет вид:

$$\left(1 + \frac{\partial}{\partial s}\right) R_{el}(s, \mu_0, \mu) = \frac{\mu_0 |\mu|}{\mu_0 + |\mu|} x(\mu_0, \mu) + \int_{-1}^0 R_{el}(s, \mu_0, \mu') x(\mu', \mu) d\mu' \quad (3)$$

где μ_0, μ – косинус угла падения и отражения соответственно, s – пробег, измеряемый в длинах среднего свободного пробега между упругими соударениями. Для электронов и ионов уравнение (3) отличается лишь видом сечения упругого рассеяния.

Описание процессов неупругого взаимодействия частиц с электронной подсистемой выполняется определением функции $T_{in}(z, \Delta)$ в диффузионном приближении [4]. Наряду с традиционным описанием флуктуаций энергетических потерь [4] в работе учитывается аппаратная функция энергоанализатора, эффект Доплера, энергетическое уширение зондирующего пучка. Для сравнения расчетов с экспериментальными данными по угловым распределениям и энергетическим спектрам необходим учет явления перезарядки.

Сравнение расчетов с экспериментальными данными подчеркивает неточность определения величины средних потерь энергии на единицу длины легких ионов термоядерных энергий в твердых телах.

Список литературы

1. Afanas'ev V.P., Naujoks D. // Phys. Stat. Sol. 1990. V. 164. P. 133.
2. Salvat-Pujol F., Werner W.S.M. // Phys. Rev. B 2011. V. 83. № 19. P. 195416.
3. Afanas'ev V.P., Efremenko D.S., Kaplya P.S. // J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom. 2016. V. 210. P. 16–29.
4. Калашников Н.П., Ремизович В.С., Рязанов М.И. Столкновение быстрых заряженных частиц в твердых телах. Москва : Атомиздат, 1980. С. 272.

И.Д. ЖДАНОВ, А.Е. ЕВСИН, Н.О. САВВИН, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЗАХВАТ ВОДОРОДА В ЦИРКОНИЕВЫЙ СПЛАВ Э110 ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Исследованы особенности захвата водорода в циркониевый сплав Э110 под действием электронного облучения. Показано, что облучение электронами в среде $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ обеспечивает ускорение наводороживания сплава Э110 в десятки раз, по сравнению с традиционными автоклавными испытаниями. При этом отмечается схожая кинетика поглощения водорода. Полученные результаты будут использованы при разработке метода ускоренных дореакторных испытаний циркониевых сплавов.

I.D. ZHDANOV, A.E. EVSIN, N.O. SAVVIN, I.E. KONDRATIEV, L.B. BEGRAMBEKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

HYDROGEN TRAPPING IN ZIRCONIUM ALLOY E110 UNDER ELECTRON IRRADIATION

The features of hydrogen trapping in zirconium alloy E110 under electron irradiation are studied. It is shown that irradiation in $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ gas accelerates the hydrogenation of E110 by dozens of times compared to autoclave tests. At the same time, a similar kinetics of hydrogen absorption is detected. The results will be used in the development of a method for accelerated testing of zirconium alloys.

Циркониевые оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) легководных реакторов подвергаются коррозии и наводороживанию под воздействием водного теплоносителя. Для повышения их ресурса разрабатываются новые сплавы, методы обработки поверхности и защитные покрытия, что требует проведения многочисленных дореакторных испытаний. Традиционные испытания, заключающиеся в выдержке образцов в высокотемпературной воде или паре в автоклаве, занимают многие тысячи часов, тормозя, таким образом, развитие всех работ, направленных на повышение ресурса оболочек ТВЭЛов. В связи с этим ощущается острая потребность в создании метода ускоренных испытаний на стойкость к коррозии и наводороживанию. Ранее было показано, что облучение электронами в газовой среде $\text{Ar} + \text{O}_2$ обеспечивает многократное ускорение оксидирования циркониевых сплавов по сравнению с выдержкой в этой среде без облучения. Целью данной работы было исследовать влияние электронного облучения на процесс наводороживания циркониевого сплава в условиях растущего оксидного слоя.

Из трубки сплава Э110 (Zr-1\%Nb) диаметром 9.1 мм и толщиной стенки 1.4 мм были вырезаны четвертные сегменты длиной 8 мм, которые использовались в качестве исследуемых образцов. Образцы облучались электронами ($E = 400$ эВ, $j = 0.4$ мА) в газовых смесях $\text{Ar} + 25\%\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ar} + 25\%\text{H}_2 + 25\%\text{O}_2$ ($P = 1 \cdot 10^{-3}$ Торр) при температуре 400°C в течение 2–20 ч. Для сравнения часть образцов выдерживались в тех же газовых средах при тех же условиях, но без облучения. До и после каждого эксперимента образцы взвешивались на микровесах AND BM-20 с точностью 1 мкг для определения коррозионного привеса. Количество водорода в образцах и характер его удержания анализировались методом термодесорбционной спектрометрии.

Эксперименты показали, что электронное облучение обеспечивает ускорение оксидирования сплава Э110 в обеих газовых средах, по сравнению с выдержкой в них, в несколько раз. При этом поглощение водорода в смесях $\text{Ar} + \text{H}_2 + \text{O}_2$ и $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ происходит по-разному. Ни выдержка, ни облучение электронами в газовой среде $\text{Ar} + \text{H}_2 + \text{O}_2$ в течение 20 ч не вызывают захвата водорода в сплав Э110. Выдержка в газовой среде $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ при тех же условиях также не приводит к наводороживанию сплава за исследуемый период, однако если образец облучается в этой среде электронами, то содержание водорода в нем за 20 ч увеличивается вдвое. Сделан вывод о том, что захват водорода в сплав Э110 при электронном облучении инициируется за счет диссоциации электронным ударом молекул, находящихся в поверхностном сорбированном слое. Поскольку степень покрытия поверхности молекулами воды на несколько порядков больше, чем молекулами водорода, то захват водорода, находящегося в составе молекул воды, по этому механизму происходит значительно эффективнее.

Кинетика наводороживания сплава Э110 при электронном облучении в газовой среде $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ оказалась аналогичной кинетике поглощения водорода при традиционных автоклавных испытаниях. Вначале в обоих случаях наблюдается «инкубационный» период, когда содержание водорода в образце почти не меняется. Предположительно, в этот период происходит накопление гидроксильных групп в растущем оксидном слое. При электронном облучении «инкубационный» период длится около 3 ч, в то время как при автоклавных испытаниях (пар 400°C , 110 атм) он составляет 300–500 ч. Затем наступает период резкого ускорения захвата водорода в сплав Э110, обусловленный, по-видимому, облегченным транспортом водорода сквозь оксидный слой, насыщенный гидроксильными группами. Скорость наводороживания сплава Э110 на этой стадии при электронном облучении в смеси $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ оказывается в десятки раз больше, чем при выдержке в паре.

Таким образом, в результате проведенных исследований удалось определить условия электронного облучения, обеспечивающие многократное ускорение и оксидирования, и наводороживания циркониевого сплава, по сравнению с традиционными автоклавными испытаниями. Эти режимы, а также полученное понимание физических механизмов, способствующих ускорению этих процессов, будут использованы в дальнейшем при создании метода ускоренных испытаний оболочек ТВЭЛов легководных реакторов.

С.М. МУРОМСКИЙ, А.Е. ЕВСИН, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, А.М. ЗАХАРОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ Fe-Cr-Al В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ СОСТАВА И УСЛОВИЙ ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ НА СТАЛЬ ЭП-823

Исследована зависимость структуры покрытий Fe-Cr-Al от их состава и условий плазменного осаждения на сталь ЭП-823, а также изменения, происходящие в этих покрытиях при длительном прогреве. Показано, что снижение содержания Al в покрытии, уменьшение температуры подложки и применение ионного ассистирования при осаждении покрытия подавляют формирование в нем столбчатой структуры. Создание тонкого слоя Y_2O_3 между сталью и покрытием препятствует диффузии Al в сталь.

S.M. MUROMSKIY, A.E. EVSIN, I.E. KONDRATIEV, A.M. ZAKHAROV, L.B. BEGRAMBEKOV

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

A STUDY OF THE STRUCTURE OF Fe-Cr-Al COATINGS DEPENDING ON THEIR COMPOSITION AND CONDITIONS OF PLASMA DEPOSITION ON EP-823 STEEL

The structure of Fe-Cr-Al coatings deposited in plasma, as well as the changes occurring in them at elevated temperatures are studied. It is shown that a decrease in the Al content, low substrate temperature, and ion assisting during coating deposition suppress the formation of a columnar structure. The creation of a thin Y_2O_3 layer between the steel and the coating prevents Al diffusion into the steel.

Развитию быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем препятствует коррозия стальных оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) в потоке расплава свинца. Перспективным решением этой проблемы представляется плазменное напыление на оболочки защитного покрытия, состоящего из внутреннего слоя Fe-Cr-Al и внешнего слоя Al_2O_3 . Оксид алюминия известен своей инертностью к расплаву свинца и к растворенному в нем кислороду, а задача внутреннего слоя – воссоздать при контакте с теплоносителем защитную пленку Al_2O_3 на поверхности в случае механического повреждения хрупкого внешнего слоя. При разработке покрытия необходимо учитывать, что защитные свойства слоя Fe-Cr-Al определяются не только его составом, но и структурой. Между тем, в литературе отсутствует информация о том, как зависит структура слоев Fe-Cr-Al от их состава и условий плазменного осаждения. Нет сведений и об изменениях структуры и состава этих слоев при длительном нахождении при эксплуатационной температуре оболочек ТВЭЛов. Изучению этих вопросов посвящена данная работа.

В качестве образцов использовались четвертные сегменты оболочки ТВЭЛа из стали ЭП-823 длиной 8 мм. На образцы в аргоновой плазме несамостоятельного разряда напылялись покрытия Fe-Cr-Al толщиной 2 мкм с соотношениями Fe/Al, соответствующими стехиометрическим алюминидам железа Fe_2Al_5 , FeAl и Fe_3Al . Напыление проводилось при различных температурах образцов в диапазоне 420–455°C. В ряде случаев формирующиеся покрытия облучались потоком ионов аргона (энергия ≈ 50 эВ, ток 7 мА). На некоторых образцах между покрытием Fe-Cr-Al и сталью наносился тонкий (50 нм) слой оксида иттрия. После напыления покрытий часть образцов выдерживалась в атмосфере аргона при 600°C в течение 500–1500 ч. Поверхности всех образцов и их поперечные шлифы анализировались методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа.

Эксперименты показали, что покрытия Fe-Cr-Al с Fe/Al = 28%/72%, напыленные при температуре 455°C, характеризуются столбчатой структурой. Данный тип структуры является крайне неблагоприятным с точки зрения защитных свойств, поскольку допускает проникновение жидкого свинца в сталь вдоль каналов между колоннами, из которых состоит покрытие. Снижение концентрации Al в покрытии до Fe/Al = 50%/50% приводило к укрупнению колонн, составляющих покрытие, а при Fe/Al = 75%/25% эти колонны полностью исчезали. Вместе с тем, подавление формирования столбчатой структуры достигалось и в покрытии с Fe/Al = 28%/72%, если оно осаждалось с применением ионного ассистирования или при пониженной температуре образца (420°C). Выдвинуто предположение, что формирование столбчатой структуры покрытия Fe-Cr-Al обусловлено кристаллизацией интерметаллидов Fe-Al с повышенным содержанием алюминия, которым свойственна вытянутая микроструктура. При этом понижение температуры подложки и ионная бомбардировка формирующегося покрытия, по-видимому, препятствуют росту кристаллов этих интерметаллидов в наиболее выгодной для них вытянутой форме.

Термические испытания образцов с покрытиями Fe-Cr-Al при эксплуатационной температуре оболочек ТВЭЛов показали, что соотношение Fe/Al в покрытиях резко уменьшается уже в течение первых 500 ч испытаний из-за диффузии Al в сталь. В покрытиях, характеризующихся столбчатой структурой, наблюдалось укрупнение колонн, однако на скорость транспорта Al это не влияло. В то же время, при наличии тонкого слоя оксида иттрия между покрытием Fe-Cr-Al и сталью концентрация Al в покрытии в процессе выдержки оставалась неизменной.

Таким образом, напыление покрытий Fe-Cr-Al при пониженной температуре, с применением ионного ассистирования или с пониженным содержанием алюминия позволяет избежать формирования столбчатой структуры, а создание тонкого запорного слоя оксида иттрия между покрытием Fe-Cr-Al и сталью позволяет избежать диффузии алюминия в сталь в процессе эксплуатации ТВЭЛа. Полученные результаты будут использованы для дальнейшей оптимизации состава и структуры защитного покрытия с целью обеспечения надежной и долговременной защиты оболочек ТВЭЛов быстрых реакторов от коррозии в свинцовом теплоносителе.

Ж.Б. САГДОЛДИНА¹, С.А. АБДУЛИНА², К.А. ШЕСТАКОВ³, М. МАУЛЕТ¹

¹ВКУ имени Сарсен Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

²ВКТУ имени Даулет Серикбаев, Усть-Каменогорск, Казахстан

³АО "Ульбинский металлургический завод", Усть-Каменогорск, Казахстан

ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ФТОРИДА МАГНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Рассмотрен плазмохимический способ переработки промышленных отходов фторида магния и получение в качестве товарного продукта оксида магния. Были выполнены расчеты термодинамических параметров реализуемого химического процесса и выбран оптимальный для него диапазон параметров, проведен термогравиметрический анализ фторида магния MgF₂.

ZH.B. SAGDOLDINA¹, S.A. ABDULINA², K.A.SHESTAKOV³, M. MAULET¹

¹Sarsen Amanzholov EKV, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²Daulet Serikbaev EKTU, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

³"Ulba Metallurgical Plant" JSC, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

PROCESSING OF INDUSTRIAL WASTE OF MAGNESIUM FLUORIDE BY PLASMA CHEMICAL METHOD

A plasma chemical method for processing industrial waste of magnesium fluoride and obtaining magnesium oxide as a commercial product is considered. Calculations of thermodynamic parameters of the implemented chemical process were performed, and the optimal range of parameters for it was selected. Thermogravimetric analysis of magnesium fluoride MgF₂ was carried out.

В настоящее время АО «УМЗ» (Республика Казахстан) является одним из немногих заводов, который использует технологию магнетермического восстановления фторида бериллия для получения металлического бериллия. На данный момент в АО «УМЗ» на бериллиевом производстве накопилось около 2000 тонн фторида магния MgF₂. В связи с ростом мирового спроса на бериллий ожидается ежегодное образование фторида магния 500 т/год. В связи с этим, переработка отходов фторида магния является актуальной проблемой для Казахстана.

Согласно технологической схеме в АО «УМЗ» бериллий получают, восстанавливая фторид бериллия магнием. При этом осуществляют реакцию: $\text{BeF}_2 + \text{Mg} \rightarrow \text{MgF}_2 + \text{Be}$. Требования, предъявляемые к бериллию для применения в атомной промышленности, по содержанию примесей имеют принципиальное значение [1].

Одним из путей решения проблемы переработки отходов является использование плазмохимического метода, т.е. химического метода получения высокодисперсных порошков нитридов, карбидов и оксидов, заключающегося в протекании реакции в низкотемпературной плазме вдали от равновесия при высокой скорости образования зародышей новой фазы и малой скорости их роста [2]. Были проведены экспериментальные работы по переработке фторида магния плазмохимическим способом, путем воздействия паровой плазмы с получением периклаза (оксида магния) и улавливанием газообразных продуктов с получением раствора фторида аммония. Определены оптимальные условия проведения плазмохимического процесса переработки фторида магния. Расчет параметров выполнялся в программном модуле Reaction Equations пакета научных программ HSCChemistry. Анализ полученных расчетов показал: в рассматриваемом диапазоне температур процесс является эндотермическим, т.е. для его реализации требуется подвод тепла извне; при температуре ~1280 °C наблюдается фазовый переход 1-го рода, обусловленный плавлением фторида магния; выше температуры ~1650 °C термодинамически возможно осуществление реакции с образованием оксида магния и фторида водорода; для достаточно полного протекания реакции температуру процесса необходимо поддерживать на уровне более 3000 °C (LogK→). Результаты термодинамических параметров хорошо согласуются с результатом термогравиметрического анализа. Термические анализы проводились на термогравиметрическом анализаторе TGA/DSC2.

Список литературы

1. Тихинский Г.Ф., Ажажа В.М., Ковтун Г.П., Еленский В.А. // Вопросы атомной науки и техники. 1998. Вып.1. № 2. С.49.
2. Ларин В.К., Кондаков В.М., Малыш Е.Н., Матюха В.А. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2003. № 8. С.59-64.

Т.Э. ГАЯНОВА¹, В.Д. СТЕПАХИН¹, Е.А. ОБРАЗЦОВА¹, Е.В. ВОРОНОВА¹, Н.Н. СКВОРЦОВА^{1,2}

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ КАТАЛИЗАТОРА ДЛЯ СИНТЕЗА В ПРОЦЕССАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В СМЕСЯХ ПОРОШКОВ ТИТАНА И НИТРИДА БОРА

Рассмотрены особенности применения карборана в качестве катализатора в синтезе частиц микро- и нано размеров в процессах, инициируемых излучением гиротрона в смесях порошков титана и нитрида бора (с гексагональной и кубической структурой). Определены пороговые условия для развития процессов, массы и состав полученных веществ.

T.E. GAYANOVA¹, V.D. STEPACHIN¹, E.A. OBRAZTSOVA¹, E.V. VORONOVA¹,
N.N. SKVORTSOVA^{1,2}

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

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

APPLICATION OF A CATALYST FOR SYNTHESIS IN PROCESSES INITIATED BY RADIATION OF A GYROTRON IN MIXTURES OF TITANIUM AND BORON NITRIDE POWDERS

The features of the use of carborane as a catalyst in the synthesis of particles of micro- and nano sizes in processes initiated by radiation of a gyrotron in mixtures of titanium and boron nitride powders (with hexagonal and cubic structure) are considered. The threshold conditions for the development of processes and the mass and composition of the obtained substances are determined.

Структуры, полученные из нитрида бора, находят применение в различных отраслях промышленности, техники, электроники, медицины. Например, производство продукции с таким покрытием востребовано для выполнения черновой и финишной обработки деталей в тяжелом машиностроении и автомобилестроении. Аэрогель нитрида бора послужил основой для создания источника белого света на основе лазера [1], наномеш нитрида бора используется в катализе [2]. В производстве высококристаллических нанотрубок из нитрида бора малого диаметра используется катализатор – водород [3]. Однако в плазмохимическом синтезе с использованием излучения мощного гиротрона невозможно использовать водород из-за высокой взрывоопасности, поэтому в качестве катализатора используется карборан (C₂H₁₀B₁₂), включающий большое количество водорода [4]. В докладе представлены особенности применения карборана в качестве катализатора в синтезе частиц микро- и нано размеров в процессах, инициируемых излучением гиротрона в смесях порошков титана (Ti) и нитрида бора (BN) с кубической (–с–) и гексагональной (–h–) структурой.

Эксперимент проводился в смесях порошков BN (–с– и –h–) с Ti в пропорциях 80/20%. C₂H₁₀B₁₂ в малом количестве либо посыпался сверху порошка, либо подмешивался в сам порошок. На каждую смесь было подано от 15 до 22 импульсов гиротрона длительностью 2 – 6 мс, мощностью 200 – 300 кВт. В результате протекающего процесса в плазмохимическом реакторе происходил синтез вторичных веществ, которые осаждались в реакторе. В эксперименте определялись неравновесные температуры газа, плазмы, поверхности, разлет частиц и другие параметры процессов. В результате синтеза происходило полное изменение структуры порошковых смесей с увеличением массы: для Ti(20%)/–с–BN (карборан сверху) в 2,25 раза, для Ti(20%)/–h–BN (карборан сверху) в 1,66 раза. В физико-химических анализах был обнаружен окисел титана. Это может свидетельствовать об участии газа в реакторе в процессах синтеза. Таким образом, было выяснено, что карборан в смесях с титаном и нитридом бора способствует горению смеси и увеличивает выход материала на стенки и дно подложки. При помощи рамановской спектроскопии были обнаружены гексагональные структуры (–h–) при протекании синтеза в смесях с кубическим нитридом бора –с–BN с насыпкой карборана сверху.

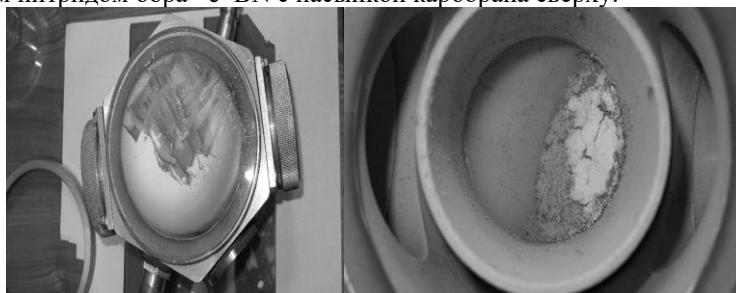


Рис. 1. Пример образования новых структур в реакторе

Список литературы

1. Schütt F., Zapf M., Signetti S. et al. // Nat. Commun. 2020, V. 11, No. 1437
2. Corso M., Awärter W., Muntwiler M. et al. // Science 2004, V. 303, No. 5655 P. 217–220
3. Kim K.S. et al. // ACS Nano 2014 V. 8. No. 6. P. 6211–6220
4. Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S. et al. //Ceramics International 2021, V. 47. No. 3. P. 3978–3987

А.К. КУТУКОВ, Д.В. КОВАЛЕНКО, В.А. БАРСУК, С.Е. ПАНИН, А.А. СЕРГЕЕЧЕВ
АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИМПУЛЬСНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Проведены исследования изменения характеристик поверхностного слоя конструкционных сталей при обработке импульсными плазменными потоками. Изучен фазовый состав поверхности в сталях в зависимости от содержания углерода при сверхбыстром нагреве и охлаждении. Определены значения микротвердости, толщина модифицированного слоя, и энергия падающего плазменного потока, оптимальная для упрочнения конструкционных сталей.

A.K. KUTUKOV, D.V. KOVALENKO, V.A. BARSUK, S.E. PANIN, A.A. SERGEECHEV
JSC «SSC RF Troitsk institute of innovation and fusion research», Moscow, Russia

THE STUDY OF CHANGES IN MICROHARDNESS AND THE STRUCTURE OF STRUCTURAL STEELS DURING SURFACE TREATMENT BY PULSED PLASMA FLOWS

The study of changes in the characteristics of structural steels surface layer after their treatment by pulsed plasma flows was carried out. The phase composition of steels surface depending on carbon content under ultrafast heating and cooling was examined. The values of microhardness, the thickness of modified layer and the optimal energy of the incident flow for structural steels treatment were determined.

В ходе эксплуатации большой процент деталей выбраковывается вследствие износа рабочей поверхности. Одно из решений проблемы – упрочнение поверхностных слоев путем воздействия на них импульсными потоками плазмы.

Целью работы было исследовать структуру и изменение микротвёрдости поверхностных слоев конструкционных сталей после обработки импульсными плазменными потоками. В работе впервые проведена обработка с длительностью импульсов ~1 мс с удельной плотностью энергии падающего потока до 80 Дж/см². В качестве исследуемых материалов были выбраны низкоуглеродистые (20Х и др.), углеродистые (50ХН и др.) и высокоуглеродистые (60С2ХА и др.) низколегированные стали.

Обработка поверхности конструкционных сталей проводилась на квазистационарном плазменном ускорителе с собственным магнитным полем (КСПУ). Исследуемые образцы устанавливались в камере с вакуумом 10⁻⁴ мм.рт.ст. В качестве рабочего газа использовался гелий – инертный газ, не вступающий в химические реакции со сталями при нагреве до высоких температур и практически не растворимый в металлах.

Микроструктуру торцевых образцов, обработанных импульсным плазменным потоком, изучали после травления поверхности с использованием 4%-ого раствора азотной кислоты в спирте. В результате проведения обработки поверхности конструкционных сталей образовался модифицированный слой с наличием нескольких зон: зоной закалки и зоной термического влияния. Аналогичные результаты наличия нескольких зон, имеющих разные свойства, были описаны в работе [1]. Во всех обработанных образцах толщина слоя мартенсита закалки сильно неравномерная и в зависимости от марки стали и режима обработки может колебаться в диапазоне от десятков до сотен мкм. Микротвёрдость измерялась по методу Виккерса. Увеличение микротвердости конструкционных сталей после обработки достигается не менее чем в 1.5 раза. В низкоуглеродистой стали после обработки в поверхностном слое закалки образуется структура малоуглеродистого мартенсита с относительно невысокими значениями микротвердости. Структура углеродистой стали после обработки состоит из мартенсита закалки с высокими значениями микротвердости, а в высокоуглеродистой стали помимо мартенсита присутствует фаза остаточного аустенита, которая снижает показатели микротвердости

Список источников

1. Калинин Б. А. Радиационно-пучковые технологии обработки конструкционных материалов / Б. А. Калинин // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – № 4. – С. 5-16.

КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЖИМ ДУГОВОГО ИСПАРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СУБМИКРОСЕКУНДНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ*

Данная работа посвящена исследованию новой разновидности комбинированного вакуумного дугового осаждения, в которой субмикросекундные сильноточные импульсы накладываются на постоянный ток дугового разряда с целью увеличения концентрации плазмы и повышения ионного воздействия на подложку. В работе представлены результаты оптических и зондовых измерений, полученных в комбинированном режиме распыления титана в среде аргона.

V.O. OSKIRKO, I.M. GONCHARENKO, A.N. ZAKHAROV, M.I. AZHGIKHIN, A.A. SOLOVYEV

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

COMBINED ARC EVAPORATION MODE USING SUBMICRO-SECOND HIGH-CURRENT PULSES

This work is devoted to the study of a new kind of combined vacuum arc deposition in which submicrosecond high-current pulses are superimposed on the DC current of the arc discharge in order to increase the plasma concentration and increase the ion impact on the substrate. The paper presents the results of optical and probe measurements obtained in the combined mode of titanium sputtering in argon.

В комбинированных режимах работы дуговых испарителей (в зарубежной литературе - pulse-enhanced vacuum arc evaporation (PEVAE)) на постоянный ток дугового разряда накладываются импульсы. Это приводит к повышению равномерности выработки мишени, повышению стабильности процесса осаждения, снижению порогового тока удержания дуги и улучшению характеристик напыляемых покрытий, относительно режимов постоянного тока [1,2]. Во время импульса обеспечивается высокое разрядное напряжение, что приводит к увеличению энергии эмитируемых электронов и концентрации плазмы. В настоящей работе показано, что эффект увеличения ионизации, наблюдаемый в PEVAE, можно усилить путем применения коротких импульсов с высокой амплитудой и скоростью роста разрядного тока. На рис. 1.а представлены осциллограммы импульса разрядного тока длительностью 1.4 мкс и амплитудой 1 кА в комбинированном режиме s-PEVAE. Во время импульса к разрядному промежутку прикладывается напряжение около 300 В, благодаря чему скорость роста тока превышает 1 кА/мкс. Частота импульсов может достигать нескольких единиц и даже десятков кГц, что приводит к существенному увеличению средней плотности ионного тока, протекающего на подложку. Зависимости на рис. 1.б показывают, что в комбинированном s-PEVAE режиме обеспечивается более высокая плотность ионного тока на подложку, по сравнению с режимом постоянного тока (DCVAE) при одинаковой средней мощности разряда. В работе приводятся результаты оптических измерений интенсивности излучения плазмы и скорости осаждения в комбинированных режимах s-PEVAE.

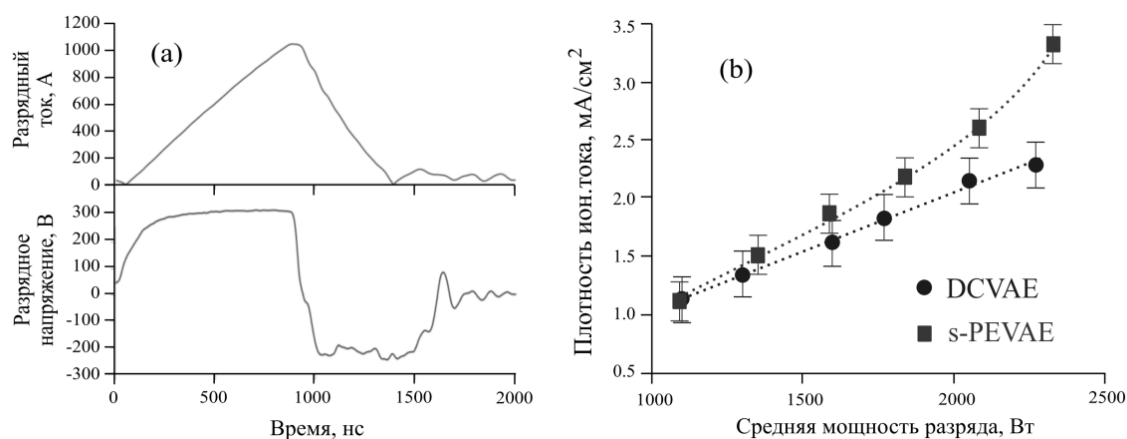


Рис. 1. а) Импульсы разрядного тока и напряжения в комбинированном режиме, б) Зависимость плотности ионного тока от мощности разряда в комбинированном режиме (s-PEVAE) и в режиме постоянного тока (DCVAE).

Список литературы

1. Ellrodt M., Mecke H. // Surface and Coatings Technology. 1995. Vol. 74-75. P. 241-245.
2. Ma Y., Gong C., Tiana X. and others // Vacuum. 2017. Vol. 139. P. 37-43.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00627, <https://rscf.ru/project/22-29-00627/>.

М.Б. ШАВЕЛКИНА¹, И.В. АНТОНОВА^{2,3}, П.П. ИВАНОВ¹, Р.А. СООТС², Р.Х. АМИРОВ¹, В.А. КАТАРЖИС¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

ПЛАЗМОСТРУЙНЫЙ СИНТЕЗ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА ДЛЯ ГИБКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Проведены экспериментальные и теоретические исследования синтеза гексагонального BN в плазменных струях гелия, генерируемые плазмотроном постоянного тока. На основе синтезированных материалов была создана гибридная наноструктура с графеном.

M.B. SHAVELKINA, I V ANTONOVA^{2,3}, P.P. IVANOV¹, R A SOOTS², R. Kh. AMIROV¹, V.A. KATARZIS

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

PLASMAJET SYNTHESIS OF HESAGONAL BORON NITRIDE FOR FLEXIBLE ELECTRONIC

Experimental and theoretical studies have been carried out on the synthesis of hexagonal BN in helium plasma jets generated by a DC plasma torch. Based on the synthesized materials, a hybrid nanostructure with graphene was created.

Гексагональный нитрид бора (h-BN) является перспективным материалом для применения в нанoeлектронике [1], в энергетике [2]. h-BN подобно графиту может существовать в виде отдельных монослоев. В работе [3] пленки из h-BN были сформированы на кремниевых подложках с помощью микроволнового плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы смеси $\text{BF}_3\text{-N}_2\text{-H}_2$ при 800 °C, CVD-методом из газовой смеси $\text{BCl}_3\text{-NH}_3\text{-H}_2\text{-N}_2$ при 1000 °C [4], магнетронным распылением мишени BN в атмосфере Ar, N_2 и H_2 при температурах выше 500 °C [5],

В отличие от существующих методов синтеза слоев h-BN, в основе которых лежит принцип «снизу-вверх» в данной работе был применен принцип «сверху-вниз». В качестве прекурсора был использован порошок гексагонального нитрида бора (ТУ 2-036-707-77). Пиролиз порошка проведен в плазмохимическом реакторе с помощью плазмотрона постоянного тока при давлениях 500 и 710 Торр. Плазмообразующий газ - He.

Численное моделирование процесса разложения порошка нитрида бора в области высоких температур в предположении локального термодинамического равновесия [6] показало (рис.1), что газофазные системы, полученные при разном давлении, в области температур ниже 3300 К заметно отличаются по концентрации электронов (E), а также компонентов B (Bc) и N (N2). С ростом давления (710 Торр) синтез h-BN происходит при более высоких температурах, что приводит к более высокой концентрации заряженных частиц и образованию мелких частиц довольно близкого размера. Экспериментально оказалось, что такие изменения компонентов синтеза влияют как на процесс нуклеации, так и на конечный результат синтеза. При давлении 500 Торр формируются шароподобные структуры, а с повышением давления до 710 Торр образуются мелкие хлопья h-BN близкого размера.

Для применения в гибкой электронике были использованы наночастицы h-BN, синтезированные при 710 Торр, в комбинации с графеном, также синтезированным с помощью плазмотрона постоянного тока [6]. В композите h-BN:Графен получен синергетический эффект, который позволил создать гетероструктуры с управляемыми свойствами.

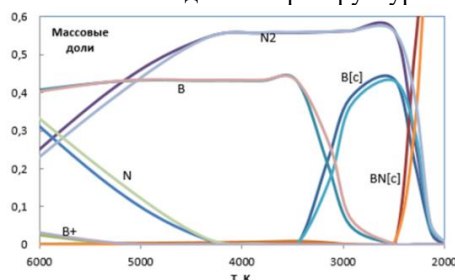


Рис. 1. Эволюция компонентов в плазме гелия при 500 и 710 Торр.

Список литературы

1. Lian W., Ge X., Ge J. et al. // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9, P. 938.
2. Sheng W., Amin I., Neumann C., Dong R., Zhang T. et al. // *Small*. 2019. Vol. 15, № 19.
3. Yu J., Qin L., Hao Y. et al. // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4, № 1. P. 414.
4. Zhang C., Hao X., Wu Y. et al. // *Mater. Res. Bull.* 2012. Vol. 47, № 9. P. 2277.
5. Ben Moussa B. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. Vol. 45, №13. P. 135302.
6. Shavelkina M.B., Ivanov P.P. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019. V.52. P. 495202

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ ПЛАЗМЫ БУФЕРНОГО ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В СЕПАРАТОРЕ С ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМОЙ

В рамках развития концепции плазменной сепарации ОЯТ в конфигурации с потенциальной ямой исследованы энергетические параметры буферного отражательного разряда в атмосфере аргона (характерные параметры 0,2 мТорр, 550 В, 1,4 кГс). С помощью многосеточного зонда измерены энергетические спектры ионов разряда при различном положении по радиусу камеры. Показано уширение спектра при приближении к оси симметрии разряда.

S.B. VETROVA^{1,2}, N.N. ANTONOV², G.D. LIZYAKIN², YU.A. BYKOV², A.V. GAVRIKOV²¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia² Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia**ENERGY DISTRIBUTION OF IONS IN BACKGROUND REFLECT DISCHARGE PLASMA IN MASS-SEPARATOR WITH POTENTIAL WELL**

To contribute to the plasma separation problem in configuration with potential well energetic parameters of the background reflect argon discharge (typical conditions 0,2 mTorr, 550 V, 1,4 kG) are studied. Energy specters of ions in different radial coordinates are measured via multigrid energy analyzer. The increment in specters width with approaching to the discharge axis is shown.

Данное исследование входит в комплекс работ по разработке концепции плазменной масс-сепарации [1]. Метод предполагает разделение ионов рабочей смеси в скрещенных полях в условиях компенсации объемного заряда за счет наличия буферной плазмы. В качестве источника буферной плазмы на данном этапе используется отражательный разряд [2]. Параметры буферного разряда влияют на траектории разделяемых частиц и на качество сепарации в целом. Так, в данном исследовании рассмотрена зависимость энергетических характеристик ионов отражательного разряда от радиальной координаты. Данные были получены с помощью многосеточного зонда.

На рис.1 приведена принципиальная схема эксперимента. В качестве буферного газа использовался аргон при давлении порядка 0,2 мТорр. Индукция магнитного поля, направленного вдоль оси камеры, составляет 1,4 кГс. На торцах камеры расположена система конических электродов для задания радиального распределения электрического потенциала: от 0 В на стенках камеры до -350 В вблизи оси. Использование горячего катода из LaB₆ на одном из торцов позволяет существенно повысить ток разряда (типичные значения 5-15 А) и обеспечить градиент потенциала до 18 В/см. В центральной части камеры установлен подвижный многосеточный зонд, радиальная координата которого варьировалась во время эксперимента с помощью ШВП и вакуумного ввода Вильсона.

В ходе экспериментального исследования было обнаружено отличие токов на многосеточный зонд при различном его ориентировании до двух порядков величины, что говорит о существовании направленного движения плазмы, соответствующего вращению в скрещенных полях. На рис.1 приведены спектры ионов отражательного разряда в направлении вращения плазмы на различном удалении от оси камеры.

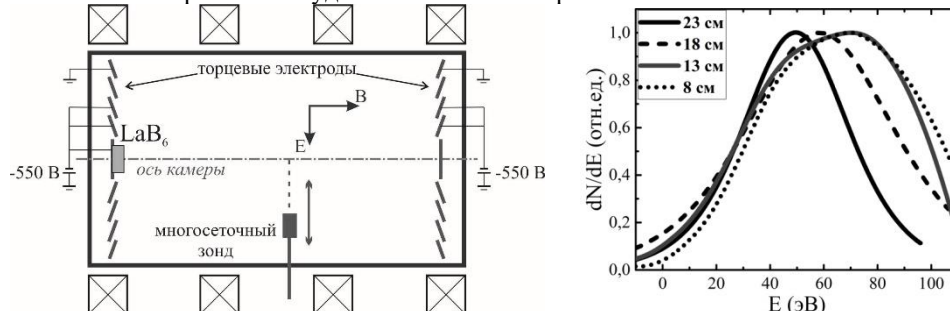


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки и измеренные энергетические спектры ионов разряда в тангенциальном направлении при различных радиальных координатах зонда.

При приближении к оси камеры заметно возрастает ширина энергетического спектра – от 40 до 70 эВ. Предполагается, что основной вклад в уширение вносит увеличение абсолютного значения амплитуды колебаний потенциала плазмы отражательного разряда из-за наличия на оси симметрии минимума потенциала (до -350 В).

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук (МК-5652.2021.1.2).

Список литературы

1. Liziakin G.D. et al. Plasma mass separation in configuration with potential well // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. V. 54.
2. Liziakin G.D., Oiler A.P., Gavrikov A.V., Antonov N.N. and Smirnov V.P. Radial distribution of the plasma potential in a cylindrical plasma column with a longitudinal magnetic field // J. Plasma Phys. 2021. V. 87.

А.П. ОЙЛЕР^{1,2}, Г.Д. ЛИЗЯКИН¹, А.В. ГАВРИКОВ^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки объединённый институт высоких температур (ОИВТ РАН), Москва, Россия

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАЗМЕННОЙ МАСС-СЕПАРАЦИИ В АКСИАЛЬНО СИММЕТРИЧНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ПЛАЗМЫ

Рассмотрен общий случай разделения пучков заряженных частиц в аксиально симметричном поле. Показано, что нет теоретических ограничений на угол разведения пучков частиц. Выяснено, что траектории частиц очень чувствительны к изменению потенциала в перифериях траекторий. Локально модифицируя линейную зависимость потенциала от радиуса в этих точках, можно добиться углового разделения в 1.3 рад.

A.P. OILER, G.D. LIZIAKIN, A.V. GAVRIKOV²

¹Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

OPTIMIZATION OF PLASMA MASS-SEPARATION IN THE AXIAL SYMMETRIC PLASMA POTENTIAL

General case of charged particles beams separation in the axial symmetric field is considered. It is shown, that there are no theoretical limits for the divergence angle of particle beams. It is examined, that particles trajectories are very sensitive to potential in trajectories pericenters. Local modifying the linear potential dependence of radius in these points one can achieve the angle divergence in 1.3 rad.

Современным развитием разработанных в XX веке электромагнитных методов масс-сепарации являются плазменные методы, при которых пучки разделяемых веществ не испытывают кулоновского отталкивания. В ОИВТ РАН на экспериментальной установке LaPlaS [1,2], в данный момент разрабатывается метод плазменной сепарации, в котором модельные вещества (Pb и Ag) испаряются, ионизируются и далее разделяются в скрещенных радиальном электрическом и аксиальном магнитном полях. В качестве точек сбора пучков выбраны точки первого разворота траекторий, так как там частицы имеют минимальную радиальную скорость.

Ранее в работах [3,4] анализировалось разделение лёгких и тяжёлых компонент в зависимости от концентрации плазмы, магнитного поля и давления буферного газа. Изменения этих параметров вызывают изменения потенциала плазмы, и как следствие, сепарации. В работах [5,6] было показано, что потенциалом плазмы возможно управлять при помощи торцевых электродов. Так, предполагая возможность создавать любой потенциал, в данной работе проводился поиск потенциала плазмы, который сильно увеличивает качество сепарации.

В данной работе был получен интеграл, определяющий угловую координату первой точки разворота для *i*-го сорта частиц. В результате анализа его структуры было обнаружено, что множество вариантов профилей потенциала, когда происходит разделение на 180°, континуально. Поэтому была поставлена вариационная задача поиска локального минимума в окрестности изначально заданного распределения потенциала. В процессе решения этой задачи было обнаружено, что наибольшие изменения требуются в малой окрестности периферий траекторий сепарируемых частиц. Было проведено моделирование практически реализуемых изменений линейного профиля потенциала, по результатам которого удалось установить возможность увеличения углового разделения пучков с 0.5 рад до 1.3 рад.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-19-00716, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00716/>

Список литературы

1. Liziakin G. et al. Experimental demonstration of plasma mass separation in a configuration with a potential well and crossed electric and magnetic fields //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2021. – Т. 63. – №. 3. – С. 032002.
2. Liziakin G. et al. Plasma mass separation in configuration with potential well //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – Т. 54. – №. 41. – С. 414005.
3. Smirnov V. S. et al. Simulation of ion flux of actinides and uranium fission products in the plasma separator with a potential well //Physics of Plasmas. – 2020. – Т. 27. – №. 11. – С. 113503.
4. Samokhin A. et al. Numerical simulation of characteristics of uranium and fission products ion fluxes in the process of plasma separation //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2019. – Т. 47. – №. 3. – С. 1546-1552.
5. Liziakin G., Gavrikov A., Smirnov V. Negative electric potential in a cylindrical plasma column with magnetized electrons //Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Т. 29. – №. 1. – С. 015008.
6. Liziakin G. et al. Radial distribution of the plasma potential in a cylindrical plasma column with a longitudinal magnetic field //Journal of Plasma Physics. – 2021. – Т. 87. – №. 4.

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ НА УСТАНОВКЕ С ЖИДКИМ АНОДОМ ПРИ МАЛОМОЩНОМ НАГРЕВЕ

Сопоставлены теоретическое значение температуры экспериментальным данным полученных при плазменном испарении катода на установке с жидким анодом, в ходе которого образовывались сферические частицы металлов, подходящих по геометрическим параметрам для аддитивных технологий.

Y.S. BARYSHNIKOV, R.O. KURAKIN, K.V. TVERDONLEBOV, S.A. PONYAEV
Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

PROCESSES OF FORMATION OF SPHERICAL PARTICLES IN A DEVICE WITH A LIQUID ANODE UNDER LOW-POWER HEATING

The theoretical value of the temperature is compared with the experimental data obtained during the plasma evaporation of the cathode in a device with a liquid anode, during which spherical particles of metals were formed, suitable in terms of geometric parameters for additive technologies.

В результате экспериментальных исследований, полученных на установке с жидким анодом (раствор воды с NaCl) с помощью которой происходило плазменное распыление катода в виде проволоки или стружки диаметром/толщиной от 0,1 мм до 2,5 мм различных металлов (нержавеющая сталь, железо, оцинкованное железо, титан, вольфрам, медь, олово) при разных электрических режимах (постоянный ток 0,5-1,7А, напряжение 170-380В) было обнаружено несоответствие теоретического значения зависимости температуры от плотности тока: $T = \frac{Vt\rho j^2}{Cm}$ (1).

Где T – температура проволоочки-катода при замыкании ее с жидким анодом (проволочка опускалась в жидкость на 1-3 мм), V – объем проволоочки опущенной в жидкость, t – время нагрева, ρ – удельное сопротивление материала проволоочки, j – плотность тока, C – удельная теплоемкость материала проволоочки, m – масса проволоочки опущенной в жидкость. Более подробная формула, при условии, что материал проволоочки плавится/испаряется, т.е. плотность тока увеличивается, объем и масса уменьшается: $\int \int \int \frac{V e^{-t\rho j^2}}{Cm} dt dj dV dm$ (2). В описанном опыте наблюдалось не соответствие экспериментальным данным, повышение температуры согласно формуле (1) должно было быть незначительным не более нескольких градусов Кельвин и дело до оплавления/испарения не должно было доходить. Однако, на практике, происходило плазменное испарение и оплавление катода, образовывались сферические гранулы металлов порошка (рис. 1) от 15 мкм до 250 мкм, причем большая часть фракций получаемых сферических гранул по количеству подпадают под диапазон до 150 мкм, что является основным геометрическим параметром совместно со сферической формой для порошков используемых в аддитивных технологиях [1].

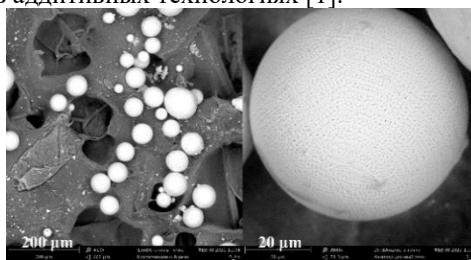


Рис. 1 Фотографии частиц порошка полученного из проволоки оцинкованного железа диаметром 0,8 мм

Образование сферических частиц наблюдалось для материалов: нержавеющая сталь, железо, оцинкованное железо, титан. Для вольфрама и олова сфероизация частиц не наблюдалась, частицы получались в виде хлопьев, для меди, большая часть частиц получалась в виде хлопьев, а меньшая, в виде сфер, что видимо позволяет предположить что сферическое образование как с другими металлами может лежать в других пределах режима эксперимента. Химический состав сферических частиц полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа свидетельствовал об образовании оксидов. Известны и другие способы, где можно наблюдать образование с идентичными геометрическими параметрами сферического порошка: при электрическом взрыве проволоочки (где токи достигают десятки кА, при напряжении более 1 кВ), разряде металла с жидким катодом (токи 100-500А, при напряжении 300-1000В) [2], и в других способах имеющих уже промышленное применение.

Описанный в данной работе способ сфероизации может рассматриваться как вариант удешевления получения сферических порошков используемых для аддитивных технологий, при доработке способа исключая оксиды.

Список литературы

1. Vock, S., Klöden, B., Kirchner, A. et al. Powders for powder bed fusion: a review. Prog Addit Manuf 4, 383–397 (2019).
2. R. N. Kashapov et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1923 012025

Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИ РАЗРЯДЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

В работе исследуется воздействие магнитного поля на возникновение структур на поверхности вольфрамовых электродов при разряде в электролите. Наблюдается появление острых образований с размерами 1-15 мкм. Вблизи оконечностей электродов происходит возникновение конических образований высотой 1-25 мкм.

D.L. KIRKO, A.S. SAVJOLOV

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

RESEARCH OF INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD AT SURFACE STRUCTURES DURING ELECTROLYTE DISCHARGE

In this work we investigate the effect of a magnetic field on the appearance of structures on the surface of tungsten electrodes during discharge in electrolyte. The appearance of pointed formations with sizes 1-15 μm is observed. Conical formations with the height 1-25 μm appear near the ends of the electrodes.

Данный разряд образуется между электродом и поверхностью электролита, которая является другим электродом, а также при двух электродах в электролите [1-3]. Диапазон рабочих токов разряда может составлять от единиц миллиампер до единиц ампер. Цвет свечения разряда определяется возбуждением атомных линий элементов, входящих в состав электролита.

В качестве электролита использовался раствор карбоната натрия Na_2CO_3 или гидрокарбоната NaHCO_3 при концентрации 0,2-0,5 М (1 М соответствует молярному весу в граммах на 1 л воды) в дистиллированной или технической воде. Применялся корпус из оргстекла объемом 150-400 cm^3 . Катод в форме стержня с диаметром 1-2 мм, материал: вольфрам, титан, располагался в электролите в керамической трубке. Для анода применялись пластины из нержавеющей стали, которые помещались около стенок корпуса. Для питания разряда использовался источник, работающий с частотой 50 Гц и 100 Гц. Около боковой стенки камеры размещались сборки из постоянных магнитов, которые создавали варьруемое магнитное поле в объеме электролита. Величина индукции магнитного поля могла варьроваться в диапазоне $B=100-800$ Гс. Дискретность изменения магнитного поля составляла $\Delta B=25$ Гс.

В экспериментах разряд включался в режиме нормального горения в течение времени 4-15 мин. Поверхности катодов исследовались с помощью микроскопов Hitachi TM1000 и VEGA 3 SEM. Взаимодействие ионов, входящих в состав электролита приводит к специфическому взаимодействию с поверхностью металла катода и происходит следующим образом. На поверхности электрода наблюдаются трещины шириной 15-35 мкм и длиной 30-60 мкм. Вблизи данных трещин располагались поверхности, содержащие "острые" образования размерами 1-15 мкм. Формирование данных структур может происходить благодаря слоистому строению вольфрамовой проволоки. Также наблюдаются участки с более упорядоченными острыми структурами похожими на тонкие нити. Элементный состав данных острых структур показал преимущественное содержание вольфрама до 92% и небольшое количество натрия до 8%, ввиду внедрения атомов натрия, содержавшихся в электролите. Применение технической воды приводит к появлению в поверхностном слое катода кальция в количестве до 10%.

Вместе с тем изучались выпуклые участки поверхности вольфрамовых катодов вблизи оконечности электродов. Наблюдаются образования, напоминающие "конусы" с размерами высотой 1-25 мкм и шириной 1-15 мкм. Данные структуры обладают обычно неправильной заостренной формой. Расположение данных конусов на поверхности хаотическое нерегулярное. Элементный состав данных структур: вольфрам около 95% и натрия около 5%. В качестве характеристики содержания данных конусов на поверхности можно ввести величину среднего количества конусов на единице площади поверхности. В результате можно проследить поведение данной величины от магнитного поля.

Список литературы

1. Багаутдинова Л.Н., Садриев Р.Ш, Гайсин Аз.Ф., Мاستюков Ш.Ч, Гайсин Ф.М., Фахрутдинова И.Т., Леушка М.А., Гайсин Ал.Ф. // ТВТ, 2019, Т.57, № 6, С. 953-956.
2. Kirko D.L., Savjolov A.S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 941, P. 012018 (5pp).
3. Кирко Д.Л. // Физика плазмы. 2020. Т.46, №6, С. 495-502.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА В КАТОДЕ, НА ФОРМИРОВАНИЕ КАТОДНЫХ ПЯТЕН

Работа посвящена изучению влияния магнитного поля тока катода в совокупности с градиентом потенциала в катоде на формирование направления первичного образования новых катодных пятен (движущихся) на поверхности катода, которые будут расширяться, как представление о процессах в катодной плазме вакуумной дуги, так и будет способствовать формированию эффективных методов управления их перемещением.

V.N. ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. KHUDAYKULOV, A.A. POPOV.

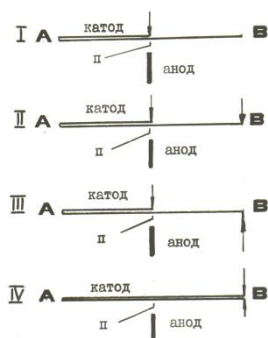
Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD OF THE CURRENT IN THE CATHODE ON THE FORMATION OF CATHODE SPOT.

Work is sanctified to the study of influence of magnetic-field of current of cathode in totality with the gradient of potential in a cathode on forming of direction of primary formation of new cathode spots (moving) on the surface of cathode, that will extend, both idea about processes in cathode plasma of a vacuum arc and will assist forming of effective methods of management their moving.

Среда для горения вакуумного дугового разряда генерируется в катодных пятнах (КП) время жизни которых составляет 10^{-6} - 10^{-7} с. Процесс отмирания и образование новых КП на поверхности катода, носит случайный характер, формирует хаотическое перемещение КП на поверхности «холодного» катода со скоростью $v \approx 10^4$ см/с. В формировании новых КП непосредственно на краю исходного решающую роль играет повышенная концентрация плазмы на краю КП, следовательно большая плотность ионного тока на катод.

Исследование перемещения КП проводилось в условиях асимметричного распределения тока в катоде в импульсном режиме вакуумной дуги. В качестве катодов использовались как фольга (Мо, Си) толщиной 0,04 -0,2 мм, Ширина рабочей поверхности катодов составляла 10 мм, Анодом являлся молибденовый стержень диаметром 3 мм, установленный на расстоянии 5 мм. Изучение роли электрического и магнитного полей тока катода на формирование направленного перемещения катодных пятен применялись бифилярные схемы электрода, приведенные на рис.1. В электродной системе, по схеме I, магнитное поле тока катода в направлении (А) существенно меньше, чем в нормальных условиях. В направлении (В) отсутствуют действия как электрического так и магнитного полей тока катода, Схема II формирует условия минимального воздействия магнитного поля тока катода в направлении (А) по



отношению к нормальной суперпозиции действия электрического и магнитного полей. направление тока в токоподводах к катоду одинаковое. Оценка роли магнитного поля проводилась при условии, что ток в токоподводящих проводниках имеет противоположные направления, схема III Сравнение результатов, полученных в электродных системах по схеме II и III позволило выявить роль магнитного поля тока проводников в перемещении катодных пятен. Для изучения перемещения катодных пятен в условиях усиленного магнитного поля тока катода применялась электродная система по схеме IV. сведение к минимуму действия магнитного поля на участке катода от места инициирования разряда в направлении (А). А в направлении (В), вследствие совпадения направления токов катода на катодные пятна на этом участке воздействует усиленное магнитное поле.

Рис.1 Схематический вид электродных систем с бифилярным катодом.

Изучение перемещения катодных пятен по схеме I, показало, что в направлении (А) существуют более благоприятные условия для образования новых катодных пятен по отношению к противоположному направлению - (В). По схеме II развитие катодных пятен со стороны действия нормальной суперпозиции электрического и магнитного полей тока катода имеет некоторое преимущество по сравнению с областью, в которой основное действие оказывает только электрическое поле тока катода, а магнитное поле минимально.

Сравнение результатов по схеме II и по схеме III рис.2.3. показало, что преимущественное образование катодных пятен практически не зависит от расположения токосъемных проводников у катода, а значит и их магнитного поля. Изучение перемещения катодных пятен в условиях усиленного действия магнитного поля тока катода по схеме IV показало, что в области действия электрического поля катода и минимального действия магнитного поля тока катода направлении - (А) существуют более благоприятные условия для образования новых катодных пятен по отношению к противоположному направлению - (В)

Полученные результаты указывают на то, что магнитное поле тока катода играет определенную роль формировании преимущественного перемещения катодных пятен по направлению к токосъему решающее влияние на этот процесс оказывает электрическое поле тока

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ИОНАМИ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

В работе рассмотрены физико-технические аспекты формирования процесса очистки металлической поверхности ионами плазмы тлеющего разряда. Представлены функциональные схемы установки и процесса, реализующего очистку поверхности ионами плазмы тлеющего разряда

V.N. ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV, I.KH. KHUDAYKULOV, A.M. JURAVLEV.

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

METHOD OF FORMING THE PROCESS OF CLEANING THE METAL SURFACE BY GLOW DISCHARGE PLASMA IONS

The paper considered the physical and technical aspects of the formation of vacuum-arc deposition coating process under ion bombardment and synthetic materials. The functional diagram of the apparatus realizing the vacuum arc deposition "ionic" reactive coating film such as nitrides, carbides, and the other a high hardness, wear resistance, corrosion resistance.

В основе метода преднапылительной очистки поверхности изделия ионами плазмы тлеющего разряда лежат физические особенности электрических разрядов в газовой среде. В газовой среде под воздействием разрядных процессов генерируются заряженные частицы, которыми осуществляется токоперенос между электродами разрядной системы, формируется плазма разряда. Плазма тлеющего разряда, примыкает к поверхности изделия, которое находится под отрицательным потенциалом по отношению находящегося под положительным потенциалом анода электроразрядной системы. Ионы плазмы тлеющего разряда, генерируемой в разрядном промежутке с поверхности плазменного образования, под действием вытягивающего потенциала устремляются к обрабатываемой поверхности и при взаимодействии с ней удаляют различного рода наслоения, загрязнения.

Разряд зажигается в атмосфере рабочего газа (инертные газы, азот) создаваемой вакуумированном пространстве вакуумной камеры установки. Изделия размещается в соответствии с параметрами технической и электродной систем установки, на специальном устройстве - рабочем столе. В вакуумированную камеру напускается рабочий газ, например, аргон, до давления в камере $10 \cdot 10^{-1}$ Па, в атмосфере которого формируется тлеющий разряд с параметрами, обеспечивающими необходимый режим очистки обрабатываемой поверхности. Плотность тока ионов до 8 mA/cm^2 , напряжение на электродной системе 400-900В. Системы формирования рабочей среды в вакуумной камере -напуска плазмообразующего газа и - вакуумной откачки работают постоянно для поддерживая соответствующих параметров разрядной газовой среды. На Рис.1 представлена схема установки очистки ионами плазмы тлеющего разряда.

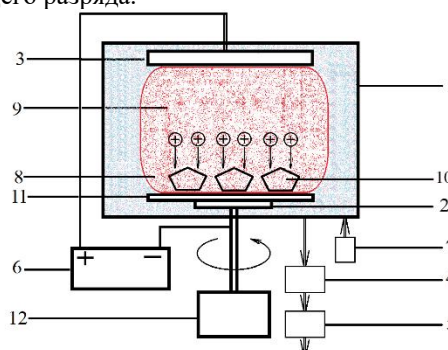


Рис. 2. Функциональная схема установки очистки ионами плазмы тлеющего разряда.

камера вакуумной установки-1; *катод*-2; анод -3; система вакуумирования4;5; *система* подачи реактивного газа-7; источник питания тлеющего разряда ($U = 800\text{В}$ $I = 10\text{А}$)- 6; плазма тлеющего разряда-8; *обрабатываемые* изделия-10;вращающийся рабочий стол-11;изолированный от камеры электропривод вращения рабочего стола-12.

В результате осуществления процесса очистки ионами плазмы тлеющего разряда обрабатываемой поверхности повышается адгезия и однородность наносимого покрытия. увеличивается срок службы изделий. Управление процессом очистки ионами плазмы тлеющего разряда осуществляется давлением рабочего газа в вакуумированном объеме, напряжением на электродах разрядной системы, плотностью тока, энергией бомбардирующих ионов. Интенсивно развиваются технологии, обеспечивающие повышение эксплуатационных свойств и срок службы деталей. Наряду с вакуумными, ионно-плазменными методами нанесения защитных, упрочняющих покрытий на рабочую поверхность изделия, интенсивно развиваются термодиффузионные методы и прежде всего цинкование позволяющие наносить покрытия высокого качества на изделия различной геометрии.

И.Х. ХУДАЙКУЛОВ, Б.Р. КАХРАМОНОВ, В.Н. АРУСТАМОВ, Х.Б. АШУРОВ.
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ КОНТАКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ

Morphology of contacts to solar panels.

I.KH KHUDAIKULOV, B.R. KAKHRAMONOV, V.N. ARUSTAMOV, KH.B. ASHUROV.
Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

INVESTIGATION OF THE MORPHOLOGY OF CONTACTS IN SEMICONDUCTOR MATERIALS PRODUCED BY THE VACUUM-ARC METHOD

Morphology of contacts to solar panels.

Одним из важнейших вопросов на сегодняшний день является эффективное использование альтернативных источников энергии. Поэтому важно, изучить адгезию, качественную морфологию контактов к элементам солнечных панелей.

Процесс нанесения медного покрытия на поверхность кремниевой пластины проводился при следующих параметрах: ток вакуумного дугового разряда - 60А-100А, напряжение на разрядном промежутке составляло 40-60В, давление остаточной среды в камере составляло 10^{-1} - 10^{-3} Па. При магнетронного распылении, скорость роста наносимого слоя составляет ~ 3-4 мкм [1], а вакуумно-дуговом методе на ~ 20-30 мкм [2].

В качестве подложки была выбрана кремниевая монокристаллическая пластина толщиной 250 мкм, ориентацией (111). Половина поверхности образца кремния была экранирована, а другая половина была покрыта медью вакуумно-дуговым методом. Было проведено сравнительное изучение шероховатости участков поверхности до и после вакуумно-дуговой напыления. На рис. 1 показано 2D изображение образца кремния, наполовину экранированного, а наполовину покрытого медью.

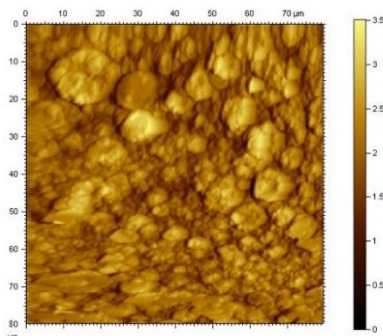


Рис 1. 2D изображение поверхность Si (111) с порытыми медного слой.

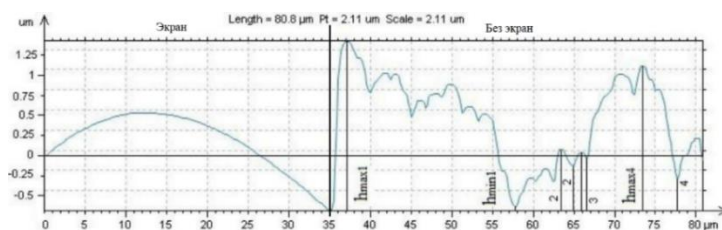


Рис.2. Профиль шероховатость поверхность кремния:

На рис. 2. Показано что, базовая длина $L=80,8$ мкм в экранированной части $R_{max}= 1,23$ нм. В части где медный слой $R_{max} = 1,34$ нм, шероховатость профиля $R_z = 0,26$ нм.

Таким образом это позволяет наносить медные контакты на кремниевые образцы вакуумно- дуговым методом.

Список литературы

- [1]. Н.С. Заяц, В.Г. Бойко, П.А. Генцарь ¶, О.С. Литвин, В.П. Папуша, Н.В. Сопинский «Оптические исследования пленок AlN/n-Si (100), полученных методом высокочастотного магнетронного распыления», Физика и техника полупроводников, 2008, том 42, вып. 2, сс. 195-198)
- [2]. (В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худайкулов, Б.Р. Кахрамонов. «К вопросу о генерации плазменного потока вакуумным дуговым разрядом и осаждения покрытий» Uzbek Journal of Physics, 2018г, PP.192-196).

И.Г. ЛЕБО

МИРЭА-Российский технологический университет, Институт искусственного интеллекта, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ МОЩНЫХ УФ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ МИШЕНЯМИ

Обзор работ посвящен численному моделированию экспериментов по взаимодействию мощных импульсов KrF лазера с конденсированными мишенями. Обсуждается возможность использования мишеней в виде встречных конусов в гибридном ядерно-термоядерном реакторе с эксимерным лазерным драйвером.

I.G. LEBO

Russian Technological University-MIREA, Institute of Artificial Intelligence, Moscow, Russia

NUMERICAL MODELING OF THE EXPERIMENTS OF THE POWER UV LASER PULSE INTERACTION WITH THE CONDENSE TARGETS

A review has devoted the numerical modeling of the power UV-laser pulse interaction with the condense targets. The opportunity of the use of two-side cone laser targets in hybrid fusion-fission reactor with excimer laser driver has discussed.

Одним из основных претендентов на драйвер в будущем термоядерном реакторе является мощный эксимерный лазер. В докладе представлены результаты численного моделирования лазер-плазменных экспериментов. Эксперименты выполнены на установке «ГАРПУН» (KrF- эксимерный лазер, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН). Моделировались три серии экспериментов: 1) прожигание алюминиевых фольг различной толщины [1]; 2) изучение развития неустойчивости при ускорении тонких алюминиевых фольг мощным УФ импульсом и формирование турбулентного слоя [2], [3]; 3) взаимодействие мощных УФ импульсов с двухслойными мишенями (алюминий плюс оргстекло) и исследование «тонких» структур, формирующихся в веществе [4, 5].

Изучается сжатие и нагрев термоядерной мишени в виде двойных встречных конусов при облучении ее мегаджоульным KrF- лазерным импульсом в гибридном реакторе [6, 7].

Численное моделирование выполнено по двумерным цилиндрическим программам “NUTCY” (эйлеровы координаты) и “Atlant_C” (лагранжевы координаты) [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №19-02-00875, и в рамках научной программы Национального центра физики и математики.

Список литературы.

- [1]. V.D.Zvorykin, I.G.Lebo. // Laser and Particle Beams, (1999), v.17, 69-88.
- [2]. В.Д. Зворыкин, И.А. Краснюк, И.Г. Лебо, А.О. Левченко. // Краткие сообщения по физике ФИАН. (2005), №9, 34-41.
- [3]. I.G. Lebo, V.D. Zvorykin // Physica Scripta. IOP Publishing. Phys. Scr. T132 (2008) 014018.
- [4]. V. Zvorykin, I. Lebo, A. Shutov, N. Ustinovskii. // Matter and Radiation at. Extremes. (2020), 5, 03540.
- [5]. И.Г. Лебо. // Российский технологический журнал, (2021), 9(1), 71-79.
- [6] И.Г. Лебо, Е.А. Исаев, А.И. Лебо. // Квантовая электроника, (2017), 47(2), 106-110
- [7] Г.В. Долголева, И.Г. Лебо. // Квантовая электроника. (2019), 49(8), 796-800.
- [8]. И.Г. Лебо, В.Ф. Тишкин. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза. МОСКВА. ФИЗМАТЛИТ, 2006.

М.А. РОГОЖИНА, Е.Ю. ЗАРУБИНА
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНОГО ПО ТОЛЩИНЕ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ДЕЙТЕРИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ КАК ЭТАП СОЗДАНИЯ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Приведено описание технологии формирования криогенного равнотолщинного слоя дейтерия в оболочке, находящейся в экспериментальном боксе. Представлены результаты тепловых расчетов конструкции бокса, показано влияние температурных градиентов на разнотолщинность слоя, проведен анализ расчетных и экспериментальных данных. Представлены полученные криогенные слои дейтерия, которые удовлетворяют требованиям разнотолщинности слоя криогенной мишени.

M.A. ROGOZHINA, E.YU. ZARUBINA
FSUE «RFNC – VNIIEF, Sarov, Russia

FORMATION OF A CRYOGENIC DEUTERIUM LAYER UNIFORM IN THICKNESS IN A SPHERICAL SHELL AS A STEP IN MAKING A CRYOGENIC TARGET FOR LASER FUSION

The technology of forming a cryogenic deuterium uniform in thickness layer in a shell located in an experimental box is described. The results of thermal calculations of the box structure are presented, the influence of temperature gradients on the thickness of the layer is shown, the analysis of calculated and experimental data is given. The obtained cryogenic deuterium layers are presented, which meet the requirements of the uniform in thickness of the cryogenic target layer.

Важнейшим этапом развития современных исследований в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) являются технологии получения криогенных мишеней. Мишень представляет собой сферическую оболочку с криогенным слоем водородного топлива, расположенную в центре бокса-конвертора. К криогенному слою предъявляются высокие требования, в частности, разнотолщинность слоя (отклонения от сферичности) не должна превышать 1% [1]. Одним из наиболее эффективных методов выравнивания по толщине криогенного слоя нерадиоактивных изотопов водорода (дейтерий, протий и их смесь) в процессе его формирования является нагрев инфракрасным (ИК) излучением [2]. Изотопы водорода поглощают ИК-излучение, вследствие чего вещество перераспределяется с более нагретой (и более толстой) в менее нагретую (более тонкую) область на поверхности слоя. Процесс выравнивания толщины происходит с экспоненциальным затуханием, так как по мере выравнивания градиент температуры на поверхности слоя снижается. Если при этом температурное окружение оболочки будет равномерным, а поверхность оболочки изотермической, то криослой в конечном положении примет вид однородного по толщине сферического слоя, замороженного на внутреннюю поверхность сферической оболочки.

Были проведены эксперименты по формированию однородного по толщине криогенного слоя дейтерия в сферической оболочке с использованием ИК-выравнивания. При постановке эксперимента были решены следующие задачи:

- рассмотрено несколько вариантов заведения ИК-излучения в полость бокса с минимизацией риска попадания ИК-излучения напрямую на оболочку, и выбран наиболее перспективный вариант;
- подобраны материалы конструкции криогенной мишени для минимизации потерь ИК-излучения;
- проведены тепловые расчеты конструкции, выявлены недостатки, вызывающие тепловые градиенты в конструкции бокса и, как следствие, на поверхности оболочки, что подтверждалось экспериментально в виде «утолщения» и «утоньшения» в соответствующих областях криослоя.

После анализа проделанной работы были внесены соответствующие изменения в конструкцию бокса и технологию сборки и проведена новая серия экспериментов, в результате которых были получены слои дейтерия, удовлетворяющие требованиям разнотолщинности слоя (рис. 1).



Рис. 1. Криогенный слой дейтерия в сферической оболочке, разнотолщинность $\approx 1\%$ при средней толщине слоя 311 мкм.

Список литературы

1. Kucheev S.O., Hamza A.V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 091-101.
2. Bittner D.N., Collins G.W., Monsler E., Letts S. Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation. // Fusion Technology. 1999. Vol. 35. P. 244.

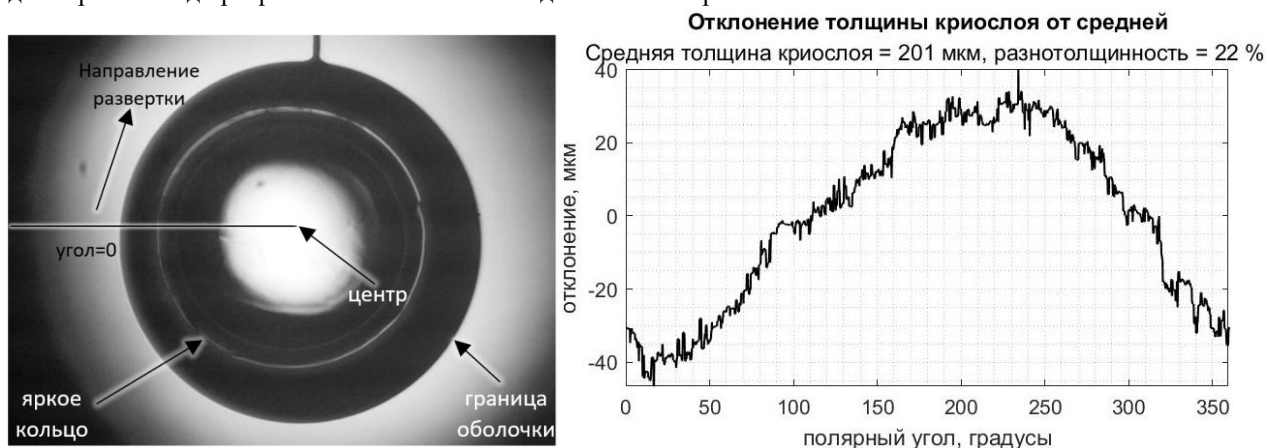
ТЕНЕВОЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Приведены промежуточные результаты работы над программой автоматической теневой диагностики слоя изотопов водорода в криогенной мишени непрямого облучения. Мишень представляет собой сферическую оболочку с замороженным на ее внутренней поверхности криогенным слоем изотопов водорода и необходима для исследований ЛТС на установке мегаджоульного уровня энергии. Перед лазерным выстрелом по мишени необходимо провести ее диагностику на соответствие требуемым параметрам.

SHADOWGRAPHIC CHARACTERIZATION METHOD OF CRYOGENIC HYDROGEN ISOTOPES LAYER IN INDIRECT-DRIVE TARGET FOR INERTIAL CONFINEMENT FUSION

The intermediate results of work in automatic shadow characterization program of hydrogen isotopes layer in indirect-drive cryogenic target are presented. The target is a spherical shell with cryogenic hydrogen isotopes layer on its inner surface and it's necessary for laser-driven fusion researches on a megajoule energy level facility. It's necessary to perform target characterization for correspondence to requirement parameters before laser shot.

Вычисление параметров криослоя основано на определении положения характеристического «яркого кольца» относительно края оболочки на теневом изображении [1], которое представлено на рисунке 1. Проведено построение теоретической модели прохождения света через оптически прозрачную оболочку с топливом, выполнена ее экспериментальная проверка. Получена зависимость толщины криослоя от параметров оболочки. В настоящее время проводится работа над программой автоматической диагностики криослоя в системе «MATLAB».



Входные данные программы: диаметр и толщина стенки оболочки, шаг по углу, названия изображения для обработки и файла для записи результата. Основные этапы программы: выделение границ на изображении; итеративный поиск внешней границы и центра оболочки; развертка изображения в полярных координатах из центра оболочки; идентификация внешней границы оболочки и «яркого кольца» из развернутого изображения; вычисление соответствующей толщины криослоя. Конечным результатом программы в данный момент являются график отклонения толщины криослоя от средней в плоскости локализации изображения, разнотолщинность криослоя, диаметр и толщина стенки оболочки, записанные в файл. В дальнейшем планируется добавить в программу Фурье-анализ внутренней поверхности криослоя и оценку погрешностей, разработать метод и программу диагностики криослоя рентгеновским методом для оптически непрозрачных оболочек.

Список литературы:

1. Three-dimensional characterization of cryogenic target ice layers using multiple shadowgraph views. LLE Review, Volume 104.

Г.А. ВЕРГУНОВА¹, С.Ю. ГУСЬКОВ¹, Н.Н. ДЕМЧЕНКО¹, Е.О. ДМИТРИЕВ¹, П.А. КУЧУГОВ^{1,2}, Р.А. ЯХИН¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский пр., 53, 119991

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл., 4, 125047

ВЛИЯНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Представлены и обсуждаются результаты расчётов коэффициента усиления мишеней лазерного термоядерного синтеза с моделированием переноса энергии быстрыми электронами при различных значениях мощности и длительности импульса 2-й гармоники излучения Nd-лазера. Установлены распределение энергии, передаваемой быстрыми электронами различным частям мишени, и степень влияния быстрых электронов на сжатие и зажигание дейтерий-тритиевого горючего, в зависимости от параметров генерации быстрых электронов, соответствующих результатам современных экспериментов.

G.A. VERGUNOVA¹, S.Yu. GUS'KOV¹, N.N. DEMCHENKO¹, E.O. DMITRIEV¹, P.A. KUCHUGOV^{1,2}, R.A. YAKHIN¹

¹*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, E-mail:yakhin.rafael@gmail.com*

²*Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Russia*

EFFECT OF FAST ELECTRONS ON THE ICF TARGETS GAIN

The results of calculations of the gain coefficient of ICF targets with the simulation of energy transfer by fast electrons at different values of power and pulse duration of the 2nd harmonic of Nd laser irradiation are presented and discussed. The distribution of the energy transmitted by fast electrons to various parts of the mixture and the degree of influence of fast electrons on compression and ignition of deuterium-tritium fuel, depending on the parameters of generation of fast electrons corresponding to the results of modern experiments, are established.

Теоретически исследуется проблема нагрева сферической термоядерной мишени быстрыми электронами, которые образуются при взаимодействии лазерного излучения с протяжённой плазмой испарённой части мишени (коронной). Показано, что за счёт удалённости области генерации лазерно-ускоренных быстрых электронов от поверхности сжимаемой части мишени значительная доля этих частиц, двигающихся в короне и многократно пересекающих её за счёт отражения в самосогласованном электрическом поле, не будет попадать в сжимаемую часть мишени. С использованием современных моделей генерации быстрых электронов показано, что в типичной мишени, рассчитанной на искровое зажигание импульсом 2-ой гармоники Nd-лазера, доля быстрых электронов, которые могут передать свою энергию сжимаемой части мишени, оказывается незначительной – 12% от общего числа этих частиц. Установлены распределение энергии, передаваемой быстрыми электронами различным частям мишени, и степень снижения сжатия дейтерий-тритиевого горючего, в зависимости от параметров генерации быстрых электронов, соответствующих результатам современных экспериментов. С одной стороны, предварительный прогрев быстрыми электронами центральной области горючего негативно влияет на степень сжатия мишени, с другой стороны, наблюдается положительное воздействие влияния быстрых электронов, связанное с повышением абляционного давления [1 - 3].

Список литературы

1. S Yu Gus'kov et al 2019 Plasma Phys. Controlled Fusion 61 105014.
2. S Yu Gus'kov et al 2019 Plasma Phys. Controlled Fusion 61 055003.
3. S Yu Gus'kov et al 2022 Plasma Phys. Controlled Fusion 64 045011.

И.Г. ГРИГОРЬЕВА¹, А.А. МАКАРОВ¹, А.Н. КОРФ¹, П.Ю. НАУМОВ¹, А.С. САВЁЛОВ¹, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ T_e В ПРОЦЕССЕ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА

Исследована динамика спектрального состава импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Проведенные исследования позволили получить экспериментальные результаты динамики электронной температуры T_e плазмы в процессе микропинчового разряда и определить последовательность стадий микропинчового разряда.

I.G. GRIGORYEVA¹, A.A. MAKAROV¹, A.N. KORF¹, P.Yu. NAUMOV¹, A.S. SAVELOV¹, G.Kh. SALAKHUTDINOV¹

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

INVESTIGATION OF PLASMA ELECTRON TEMPERATURE T_e IN THE PROCESS OF MICROPINCH DISCHARGE

The dynamics of the spectral composition of pulsed X-ray radiation from a micropinch-discharge plasma in a low-inductance vacuum spark setup has been studied. The studies carried out made it possible to obtain experimental results on the dynamics of the plasma electron temperature T_e during a micropinch discharge and to determine the sequence of stages of a micropinch discharge.

Измерение спектра импульсного рентгеновского излучения плазменных объектов с временным разрешением позволяет получить информации о параметрах излучающей плазмы, таких как электронная температура и плотность плазмы в процессе микропинчового разряда [1]. Эксперименты проводились на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» [2,3]. Рабочим веществом разряда являлись пары материала анода, изготовленного из железа. Ток разряда в экспериментах достигал 200 кА.

Для проведения данных измерений был создан комплекс диагностической аппаратуры с многоканальным сцинтилляционным спектрометром рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне $2 \div 70$ кэВ с наносекундным временным разрешением и разработана методика измерений. Каналы спектрометра построены по схеме: диафрагма + фильтр поглощения + сцинтилляционный детектор CdI_2 + оптический фильтр коррекции + ФЭУ-87. В качестве регистраторов сигналов с ФЭУ были использованы осциллографы Tektronix TDS2024B. Методика диагностики основана на измерении интенсивности рентгеновского излучения каналами регистрации спектрометра с фильтрами поглощения различной толщины. По результатам измерения строилась зависимость интенсивности рентгеновского излучения от времени для различных каналов регистрации. По полученным зависимостям строились кривые ослабления рентгеновского излучения для любого момента времени микропинчового разряда. Исследование измеренных спектров рентгеновского излучения, позволило получить динамику электронной температуры T_e плазмы.

В диагностический комплекс, также входили такие приборы и датчики, как: пояс Роговского для измерения импульса тока разряда от времени; бипланарный вакуумный фотодиод для регистрации вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения; *pin*-диод.

С помощью разработанной и созданной диагностической аппаратуры были исследованы спектры импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда с наносекундным временным разрешением. Определено, что максимальная интенсивность рентгеновского излучения во всем спектре соответствуют моменту времени образования «плазменной точки», при котором достигается максимальное значение электронной температуры плазмы. Результаты исследования импульсного рентгеновского излучения плазмы в процессе микропинчового разряда находят объяснение в рамках модели радиационного сжатия *z*-пинча, рассматривающей образование плазменных точек как результат двухстадийного сжатия плазменного столба в результате больших потерь энергии на излучение.

Список литературы

1. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211.
2. Григорьева И.Г., Костюшин В.А., Салахутдинов Г.Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7, №2. С. 107.
3. Balovnev A.V., Grigoryeva I.G., Salakhutdinov G.Kh. // Instrum. Exp. Tech. 2015. V. 58. N. 2. P. 252. doi: 10.1134/S0020441215020049

О.А. БАШУТИН¹, И.Г. ГРИГОРЬЕВА¹, А.Н. КОРФ¹, Д.А. ЛЕБЕДЕВ¹, П.Ю. НАУМОВ¹, А.С. САВЕЛОВ¹, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ¹, И.В. ЮМАТОВА¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Произведены измерения спектров импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» с пространственным разрешением. Проведенные исследования спектральных характеристик позволили получить экспериментальные результаты о параметрах плазмы в плазменной точке, прианодной плазме и аноде. Все результаты не противоречат представлениям в рамках модели радиационного сжатия z-пинча.

O.A. BASHUTIN¹, I.G. GRIGORYEVA¹, A.N. KORF¹, D.A. LEBEDEV¹, P.Yu. NAUMOV¹, A.S. SAVELOV¹, G.Kh. SALAKHUTDINOV¹, I.V. YUMATOVA¹

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

INVESTIGATION OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF X-RAY RADIATION MICROPINCH DISCHARGE PLASMAS WITH SPATIAL RESOLUTION

The spectra of pulsed X-ray radiation of micropinch discharge plasma were measured using a low-inductive vacuum spark type installation with spatial resolution. The conducted studies of spectral characteristics allowed us to obtain experimental results on the parameters of plasma in plasma points, near-electrode plasma and anode. All the results do not contradict the ideas within the framework of the z-pinch radiation compression model.

Экспериментальные исследования проводились на установки типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» (НИЯУ МИФИ) [1]. Разряд осуществлялся в вакуумной камере, откачанной до вакуума не хуже 10^{-4} Торр. Рабочая среда разряда – продукты эрозии материала электродов (железо). Ток разряда 150 кА.

Для измерения спектра высокоинтенсивного, импульсного рентгеновского излучения из исследуемых областей плазмы был разработан и создан координатно-чувствительный детектор на основе термолюминесцентных детекторов фторида лития, позволяющий измерять спектр импульсного рентгеновского излучения в диапазоне энергий 1–30 кэВ и была использована камера-обскура. Камера-обскура располагалась в разрядной камере была направлена перпендикулярно к оси разряда и охватывала всю разрядную зону. С помощью камеры - обскуры регистрировалось (на рентгеновскую пленку) изображение плазменного объекта, на котором видна структура плазмы («плазменная точка», прианодная плазма и анод).

Конструктивно детектор представлял собой пластину толщиной 10 мм, выполненную из стали, в которой имелись отверстия. В отверстия вставлялись сборки из десяти термолюминесцентных детекторов, размер одного термолюминесцентного детектора – \varnothing 5 мм и высота 0,9 мм.

По информации о поглощенной энергии в различных термолюминесцентных детекторах одной сборки можно математическими методами [2,3] восстановить спектр рентгеновского излучения. Камера-обскура увеличивает изображение источника рентгеновского излучения плазмы в несколько раз, а с помощью разработанного координатно-чувствительного детектора с точностью до 2 мм можно определить спектр импульсного рентгеновского излучения из исследуемой области плазменного объекта направив разные каналы спектрометра на источники излучения плазмы.

Спектр рентгеновского излучения «плазменная точка» отличается от спектра прианодной плазмы и анода в области энергий рентгеновских квантов $h\nu < 3$ кэВ. Можно предположить, что это отличие излучения связано с вкладом линейчатого и фоторекомбинационного излучения в области L-спектра ионов железа. Основной вклад в суммарную энергию рентгеновского излучения сильнооточного импульсного электроразряда вносит рентгеновское излучение «плазменная точка» с энергией квантов $h\nu < 3$ кэВ. Вид спектра одинаков в диапазоне энергий квантов 5–30 кэВ для всех излучающих областей разряда. Это говорит о том, что энергетические спектры ускоренных электронов, присутствующих в плазме микропинча, приэлектродной плазме и бомбардирующей поверхность электрода, аналогичны.

Список литературы

1. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211.
2. Григорьева И.Г., Костюшин В.А., Салахутдинов Г.Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7, №2. С. 107.
3. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2015. № 1. С. 100.

О.А. БАШУТИН¹, И.Г. ГРИГОРЬЕВА¹, А.С. САВЁЛОВ¹, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА

Исследована динамика пространственной структуры плазмы микропинчового разряда на установке типа “низкоиндуктивная вакуумная искра”. Получены обскурограммы и тенеграммы пространственной структуры перетяжки плазменного столба в процессе микропинчового разряда. Проведенные исследования позволяют проследить последовательность образования плазменных точек.

O.A. BASHUTIN¹, I.G. GRIGORYEVA¹, A.S. SAVELOV¹, G.Kh. SALAKHUTDINOV¹

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

DYNAMICS OF THE SPATIAL STRUCTURE OF A PLASMA OF A MICROPINCH DISCHARGE

The spatial structure of the plasma of a micropinchial discharge on a “low-inductive vacuum spark” type installation has been investigated. Obscurograms and shadowgrams of the spatial structure of the plasma column constriction in the process of micropinch discharge are obtained. The conducted studies allow us to trace the sequence of formation of plasma points.

Явление микропинчевания имеет достаточно общий характер для Z-пинчевых установок [1] и является предметом интенсивных исследований.

Установки типа “низкоиндуктивная вакуумная искра” имеют высокие параметры образованной плазмы, простую конструкцию, надежны в эксплуатации, что делает их перспективными как для фундаментальных исследований, так и для решения чисто прикладных задач в качестве мощных импульсных источников рентгеновского излучения.

Конструкция и параметры установки приведены в [2, 3]. Разряд осуществлялся в вакуумной камере, откачанной до давления не хуже 10–5 Торр. Емкость конденсаторной батареи составляла 20 мкФ. Пары материала нагреваемого анода разрядного устройства служили рабочим веществом разряда. Период разряда составлял 8.5 нс. Ток разряда в экспериментах был равен 150 кА. Расстояние между электродами составляло 5 мм. Конструкция разрядной системы позволяла изменять полярность электродов.

Исследования динамики пространственной структуры плазмы микропинчового разряда проводилась методом теневой фотографии с импульсным лазером и с помощью камер-обскура: воздушной (за пределами вакуумной камеры) и вакуумной камеры-обскура (внутри рабочей камеры). Длительность лазерного зондирующего излучения составляло 6 нс. Теневое фотографирование межэлектродного пространства осуществлялось в заданный момент времени благодаря системе синхронизации между моментом инициации разряда и импульсом зондирующего лазерного излучения.

Исследование динамики пространственной структуры плазмы микропинчового разряда на различных стадиях показало, что процесс пинчевания начинается с формирования токоплазменной оболочки и её схождения к оси разряда. В результате схлопывания токоплазменной оболочки образуется плазменный столб. В процессе дальнейшего сжатия плазменный столб испытывает изменение формы с образованием перетяжки, вызванные неустойчивостями. В случае если величина тока разряда превышает определенный уровень, то происходит микропинчевание с образованием плазменных точек. Далее следует процесс разрушения перетяжки.

Все результаты находят объяснение в рамках модели радиационного сжатия z-пинча, рассматривающей образование плазменных точек как результат развития перетяжечной неустойчивости в условиях больших потерь энергии на излучение.

Список литературы

1. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211.
2. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 100.
3. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 84.

В.С. КУРБАНИСМАЙЛОВ¹, С.А. МАЙОРОВ², Г.Б. РАГИМХАНОВ¹, З.Р. ХАЛИКОВА¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия
²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯД В ГЕЛИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В работе представлены результаты исследования импульсного разряда в гелии атмосферного давления в сантиметровом межэлектродном промежутке. С применением фотоэлектронного регистратора (ФЭР2-1) изучена динамика формирования свечения прикатодной плазмы, а также исследованы спектры оптического излучения разряда. Установлено, что импульсный разряд в гелии сопровождается распылением материала вещества электродов. На основе 0-мерной физико-математической модели изучена динамика расширения плазмы катодного факела. Методом Монте Карло выполнено моделирование диффузионно-дрейфовых характеристик электронов и ионов в гелии с малыми примесями паров металла (Fe).

V.S. KURBANISMAILOV¹, S.A. MAIOROV²,
G.B. RAGIMKHANOV¹, Z.R. KHALIKOVA¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia
²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia

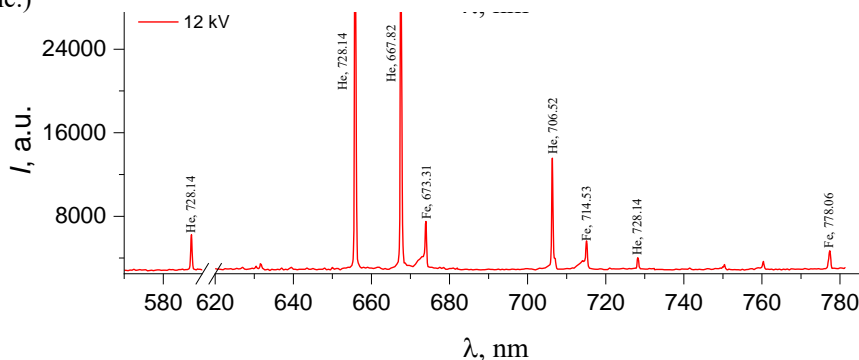
DYNAMICS OF PROCESSES OF NEAR-ELECTRODE PLASMA FORMATION IN A PULSED DISCHARGE IN ATMOSPHERIC PRESSURE HELIUM

The paper presents the results of a study of a pulsed discharge in helium at atmospheric pressure in a centimeter interelectrode gap. With the use of a photoelectronic recorder (FER2-1), the dynamics of the formation of the glow of the near-cathode plasma was studied, and the spectra of the optical radiation of the discharge were studied. It has been established that a pulsed discharge in helium is accompanied by atomization of the material of the electrode substance. On the basis of a 0-dimensional physical and mathematical model, the dynamics of the expansion of the plasma of the cathode torch is studied. The Monte Carlo method was used to simulate the diffusion-drift characteristics of electrons and ions in helium with small metal (Fe) vapor impurities.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований формирования и развития приэлектродной плазмы в импульсного разряда в гелии атмосферного давления в сантиметровом межэлектродном промежутке [1-2].

Система щелей в сочетании со скоростным ФЭУ, а также динамические картины свечения промежутка, полученные с помощью ЭОП, позволили регистрировать временной ход свечения приэлектродных областей и определить скорость расширения катодного пятна. Были получены результаты, относящиеся к стадии разлета плазмы, скорость которого равна на начальном этапе 210^6 см/с. Разработана физико-математическая модель расширения катодного факела и рассчитаны пространственно-временные распределения концентрации ионов и атомов металла, электронов, давления и плотности газа, а также скорости расширения прикатодной плазмы.

Следует отметить, что в спектре разряда наряду с линиями исследуемого газа (He) возбуждаются линии материала электродов (Fe) (см. рис.)



С увеличением энерговклада в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые спектральные линии исследуемого газа (He) и материала вещества электродов (Fe).

Методом Монте-Карло выполнено моделирование диффузионно-дрейфовых характеристик электронов и ионов в смеси гелия с малыми примесями металла. Показано, что малые примеси металла существенно влияют на характеристики дрейфа электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № № 20-08-01069а)

Список литературы

1. Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б. ЖТФ. 2019. Вып. 3. С. 384-386.
2. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М., Али Р.А.А. Физика плазмы. 2016. Т. 42. N 7. С. 680—692.

К.И. АЛМАЗОВА¹, А.А. АМИРОВА², Н.А. ДЕМИРОВ⁴, А.Н. БЕЛОНОГОВ¹, В.В. БОРОВКОВ¹,
Г.Б. РАГИМХАНОВ³, Д.В. ТЕРЕШОНОК⁴, А.А. ТРЕНЬКИН¹, З.Р. ХАЛИКОВА³

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

²Институт физики ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

³Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

⁴Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОМЕЖУТКЕ «ОСТРИЕ-ПЛОСКОСТЬ»

С использованием метода теневого фотографирования исследован искровой разряд в промежутке острие (катод) – плоскость длиной 1.5 мм в интервале времени от момента. Зарегистрированы ударная волна из прикатодной зоны разряда, предположительно, генерируемая катодными факелами на поверхности острейного электрода. Исследованы характерные особенности формирования ударных волн и их динамика.

K.I. ALMAZOVA¹, A.A. AMIROVA², N.A. DEMIDOV⁴, A.N. BELONOGOV¹, V.V. BOROVKOV¹,
G.B. RAGIMKHANOV², D.V. TERESHONOK³, A.A. TRENKIN¹, Z.R. KHALIKOVA²

¹Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

²Institute of Physics, Far Eastern Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

³Dagestan State University, Makhachkala, Russia

⁴Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow

DYNAMICS OF PROCESSES OF NEAR-ELECTRODE PLAS-FORMATION IN THE INITIAL PHASE OF THE DISCHARGE IN AIR WITH ATMOSPHERIC PRESSURE IN THE “POINT-TO-PLANE” GAP

Using the method of shadow photography, a spark discharge in the gap between the tip (cathode) and a plane 1.5 mm long was studied in the time interval from the instant. A shock wave was registered from the cathode zone of the discharge, presumably generated by cathode torches on the surface of the pointed electrode. The characteristic features of the formation of shock waves and their dynamics are investigated.

Высоковольтные импульсные разряды в плотных газах часто встречаются на практике и активно изучаются на протяжении длительного времени. Относительно недавно с применением метода лазерного зондирования и основанных на нем теневых и интерференционных методиках высокого разрешения было установлено наличие микроструктуры искрового разряда в воздухе в промежутке острие–плоскость, когда уже с первых наносекунд канал представляет собой совокупность большого числа микроканалов [5-10].

В данной работе с использованием метода теневого фотографирования исследован искровой разряд в промежутке острие (катод) – плоскость длиной 1.5 мм в воздухе атмосферного давления.

В прикатодной зоне обнаружены узкие протяженные области, распространяющиеся от поверхности острия, и интерпретируемые как прикатодные ударные волны. Такие волны регистрировались, как правило, в интервале времени от 10 до 50 ns после пробоя, а скорость их распространения составляла 1–3 км/с. Установлено, что возникновение прикатодных ударных волн сопровождается образованием катодных плазменных факелов. Области факелов сопряжены с микроканалами и имеют близкие поперечные размеры 10–15 мкм.

Высказаны предположения о том, что плазменные факелы формируются в областях контакта электрода с микроканалами и генерируют отдельные участки фронта прикатодной ударной волны, а фактором, инициирующим практически одновременное появление катодных факелов, может выступать подсветка поверхности катода ультрафиолетовым излучением из разогретого канала разряда.

Установлено, что при подаче на острый электрод импульсов напряжения положительной полярности, ударных волн, отходящих от этого электрода, обнаружено не было.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-01069).

Список литературы

1. Trenkin A.A., Almazova K.I., Belonogov A.N., Borovkov V.V., Gorelov E.V., Morozov I.V., Kharitonov S.Yu. // Technical Physics. 2020. V. 65, № 12. P. 1948.
2. Алмазова К.И., Белоногов А.Н., Боровков В.В., Курбанисмаилов В.С., Омарова П.Х., Рагимханов Г.Б., Тренькин А.А., Терешонок Д.В., Халикова З.Р. // ФП. 2021. Т. 47, № 1.
3. Parkevich E.V., Medvedev M.A., Khirianova A.I., Ivanenkov G.V., Selyukov A.S., Agafonov A.V., Shpakov K.V., Oginov A.V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28, P. 125007.

Е.Д. КАЗАКОВ^{1,2}, М.Ю. ОРЛОВ¹, М.И. ПАВЛЕНКО^{1,3}, М.Г. СТРИЖАКОВ¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия

³Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА МНОГОСЛОЙНЫЕ МИШЕНИ.

На сильноточном электронном ускорителе «Кальмар» проведены пилотные эксперименты по формированию ударных волн в многослойных диэлектрических мишенях под действием релятивистского электронного пучка. Исследовались вопросы прохождения ударной волны через границу раздела сред и затухания волны в пористых и упругих материалах. Получены экспериментальные данные для нескольких пар распространенных конструкционных материалов.

E.D. KAZAKOV^{1,2}, M. YU. ORLOV¹, M.I. PAVLENKO^{1,3}, M.G. STRIZHAKOV¹

¹NRC “Kurchatov institute”, Moscow, Russia

²National Research University MPEI, Moscow, Russia

³RUDN University, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HIGH-CURRENT ELECTRON BEAMS IMPACT ON MULTILAYER TARGETS.

Pilot experiments on the formation of shock waves in multilayer dielectric targets under the action of a high-current electron beam were carried out at the Kalmar high-current electron accelerator. The shock wave propagation through the interface between transparent materials and the attenuation of the wave in porous and elastic materials were studied. Experimental data have been obtained for several pairs of common structural materials.

В обшивке современных изделий авиационной и ракетно-космической промышленности в настоящее время часто применяются современные композитные материалы, либо многослойные структуры на их основе. Это позволяет существенно уменьшить массу летательных аппаратов, сохранив при этом высокий уровень надёжности и безопасности. Математическое моделирование отклика таких систем на экстремальные воздействия в аварийных ситуациях является крайне сложной задачей. Существующие модели требуют эмпирических констант и верификации. В связи с этим наработка значительного массива экспериментальных данных по поведению подобных материалов при высоких давлениях, температурах и при воздействии мощных потоков ионизирующего излучения является важной и актуальной задачей.

В данной работе представлены результаты экспериментов по воздействию релятивистского электронного пучка установки «Кальмар» (ток пучка до 40 кА при напряжении на диоде до 350 кВ, длительность импульса тока на полувывоте ≈ 100 нс) [1] на различные пары конструкционных материалов. Исследование производилось методом лазерного зондирования исследуемой области с хронографической регистрацией теневого изображения. В ряде экспериментов осуществлялось одновременное зондирование исследуемого образца и вакуумного диода ускорителя для сопоставления плазменных и ударно-волновых процессов. Наибольший интерес в этих экспериментах представлял переход волны через границу раздела двух прозрачных сред, а также эксперименты, где в качестве первого слоя исследовались материалы с пониженной плотностью, для которых характерно значительное затухание ударной волны [2, 3]. Для сравнения также производилось облучение пары (этилен-полипропиленовая резина-ПММА).

Наглядно продемонстрировано значительное затухание ударной волны в сферопластиках и пористых композитах даже при небольшой (3-5 мм) толщине образцов. При этом степень затухания в упругой резине оказалась не высока. При прохождении границы раздела двух прозрачных образцов, искажения волны практически не наблюдалось. Также показано, что благодаря одновременной регистрации плазменных и ударно-волновых процессов, подобный подход даёт возможность оценить скорость звука в образцах малой плотности и материалах со сложной внутренней структурой, что бывает крайне важно для задания уравнений состояния таких материалов.

Работа выполнена при поддержке НИИЦ «Курчатовский институт» (Приказ № 3026 от 25.11.2021).

Список литературы

1. Демидов Б.А., Ивкин М.В., Петров В.А., Фанченко С.Д. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 2. С. 101 – 116.
2. V. A. Demidov, V.P. Efremov, Yu.G. Kalinin et al // J. Phys.: Conf. Ser. 2016 774(1) 012129
3. Милёхин Ю.М., Садовничий Д.Н., Шереметьев К.Ю. и др. Доклады Академии наук. 2019. Т. 487. № 2. С. 159-163.

Е.Д. МАРЕНКОВ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Н.Е. ЕФИМОВ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Ю.М. ГАСПАРЯН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ДИНАМИКА ИЗЛУЧЕНИЯ САМОПОДОБНО РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Рассмотрена динамика излучения адиабатического самоподобно расширяющегося сферического плазменного облака в вакууме. Показано, что эволюция интенсивностей излучения сильно зависит от показателя адиабаты γ . Например, доказано, что интенсивность излучения в высокоионизованном плазменном облаке возрастает во времени, если $\gamma = 5/3$, и имеет минимум во времени, если $\gamma < 5/3$. Аналитические результаты сравниваются с измерениями излучения плазмы лития, созданной лазером. Образец лития облучали мощным (42 Дж/см^2) лазерным импульсом и регистрировали излучение образовавшейся литиевой плазмы монохроматором. Разумное согласие с экспериментом достигается при $\gamma = 5/4$.

E.D. MARENKOV, D.N. SINELNIKOV, N.E. EFIMOV, D.G. BULGADARYAN, YU.M. GASPARYAN

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

THE INFLUENCE OF THE ADIABATIC INDEX ON THE RADIATION DYNAMICS OF SELF-SIMILAR EXPANDING LASER PRODUCED PLASMA PLUME

The radiation dynamics of an adiabatic self-similar expanding spherical plasma plume is considered. It is shown that the radiation intensities evolution strongly depends on the adiabatic index γ . For example, it is proven that the radiation intensity in a highly ionized plasma plume increases over time if $\gamma = 5/3$ and has a minimum in time if $\gamma < 5/3$. The analytical results are compared to measurements of the radiation from lithium laser-produced plasma. A lithium sample was irradiated by powerful (42 J/cm^2) laser pulse and radiation of produced lithium plasma was registered by a monochromator. A reasonable agreement with the experiments is reached for $\gamma = 5/4$.

Рассмотрена динамика излучения автомодельного самоподобно-расширяющегося сферического плазменного облака в вакууме. Расширение облака предполагается адиабатическим, плазма прозрачна для исследуемых линий и выполняются условия локального термодинамического равновесия, так что степень ионизации удовлетворяет уравнению Саха-Больцмана. В этих предположениях интенсивность излучения для высокоионизированной плазмы зависит от показателя адиабаты γ . Показано, что если $\gamma = 5/3$, интенсивность излучения атомов увеличивается со временем до тех пор, пока температура облака не станет низкой и степень ионизации не станет большой. При $\gamma < 5/3$ интенсивность излучения атомов в высокоионизированном режиме может иметь минимум. Излучение ионов имеет более сложную зависимость от параметров облака и общих выводов о его поведении сделать нельзя.

В слабоионизованном случае интенсивности убывают со временем.

Интересно отметить, что эти результаты не зависят от конкретных профилей температуры и плотности и, следовательно, действительно, действительны для любого режима автомодельного расширения.

Теоретические результаты сравнивались с экспериментами, выполненными в НИЯУ МИФИ. Образец Li облучали импульсами Nd: YAG-лазера с длиной волны 1064 нм и длительностью 15 нс. Мощность импульса составляла $3 \times 10^9 \text{ Вт/см}^2$. Излучение плазмы регистрировалось спектрометром Avantes AvaSpec 2048 (200–1100 нм, разрешение 1 нм) или монохроматором с разрешением лучше 1 Å, оснащенный фотоумножителем в качестве детектора. Это позволило измерить как полный спектр излучения плазменного облака в диапазоне 300–800 нм, так и зависимость от времени трех наиболее ярких его линий: 610 нм, 670 нм (Li^0) и 548 нм (Li^+).

Сравнение с экспериментальными результатами показало, что зависимость интенсивности излучения от времени достаточно хорошо описывается моделью самоподобного расширения. Однако, мы видим, что следует выбирать $\gamma < 5/3$, чтобы воспроизвести качественное поведение экспериментальных интенсивностей. Разумное количественное согласие с экспериментом достигается при $\gamma = 1.25$. Такое же значение было найдено другими авторами [1,2] для серебряной плазмы на основе измерений ее параметров зондом Ленгмюра. Таким образом, можно сделать вывод, что излучение лазерной плазмы материалов с малым Z можно описать адиабатическим автомодельным расширением, но показатель адиабаты должен быть ниже, чем у одноатомного газа.

В некоторых работах [3] предлагается отдать предпочтение модели изоэнтропического расширения по сравнению с изотермической, поскольку она лучше соответствует экспериментальным результатам. Мы видим, что это не относится к излучению лазерной плазмы. В нашем случае обе модели дают разумное согласие с экспериментом и общие тенденции динамики излучения совершенно не зависят от этого предположения.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0723-2020-0043).

Список литературы

1. T.N. Hansen, J. Schou, and J.G. Lunney, Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. **69**, 601 (1999)
2. B. Doggett and J.G. Lunney, J. Appl. Phys. **109**, (2011)
3. S.I. Anisimov, B.S. Luk'yanchuk, and A. Luches, Appl. Surf. Sci. **96–98**, 24 (1996)

Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, Ю.М. ГАСПАРЯН,
Н.Е. ЕФИМОВ, С.А. КРАТ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПО LIBS СПЕКТРАМ ЛИТИЯ

Рассмотрены особенности применения графического метода Больцмана для определения электронной температуры в лазерной плазме (ЛП), получаемой на твердотельных мишенях при интенсивностях 10^9 – 10^{10} Вт/см² для задач LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy). Из экспериментальных LIBS спектров лития выбраны диагностические линии Li I и затем определена температура ЛП.

D.G. BULGADARYAN, E.D. VOVCHENKO, Yu.M. GASPARYAN,
N.E. EFIMOV, S.A. KRAT, D.N. SINELNIKOV

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

ESTIMATION OF THE ELECTRON TEMPERATURE OF LASER PLASMA BY LIBS SPECTRA OF LITHIUM

The features of the graphical Boltzmann method for determining the electron temperature in laser plasma (LP) obtained on solid-state targets at intensities of 10^9 – 10^{10} W/cm² for LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) are considered. Li I diagnostic lines were selected from the experimental LIBS spectra of lithium and then the temperature in the LP was determined.

Суть LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) заключается в исследовании эмиссионных спектров лазерной плазмы (ЛП), создаваемой при воздействии лазерного импульса на образец. Широкий спектр задач, которые решаются с помощью LIBS обусловлен возможностью получения спектров при варьировании элементного состава лазерной мишени и окружающего его газа, а также длины волны и плотности энергии лазерного излучения на мишени.

Спектры LIBS весьма удобны для определения электронной температуры ЛП с помощью графического метода Больцмана, основанного на измерении интенсивности линий. При этом в ЛП должны выполняться условия локального термодинамического равновесия (ЛТР). Согласно критерию существования ЛТР (т.н. критерий Мак-Уиртера) электронная концентрация должна удовлетворять условию

$$N_e [\text{см}^{-3}] > 1.6 \times 10^{12} T^{1/2} (\Delta E)^3,$$

где ΔE [эВ] – наибольшая энергия перехода и T [К] – температура плазмы. Для лазерной плазмы ЛТР устанавливается при превышении нижней границы $N_e^{\text{min}} \approx 6 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, которая почти всегда достигается в LIBS. Это означает, что для диагностики T могут быть использованы все уровни Li I. Дополнительное ограничение, согласно которому для этого могут быть использованы линии Li I с главным квантовым числом $n > 2$, обосновывается в работе [1]. С учетом этих рекомендаций для диагностики T_e выбраны линии $\lambda_1 = 4971 \text{ \AA}$ и $\lambda_2 = 4132 \text{ \AA}$, расчетные данные для которых приведены ниже в таблице [2].

k	Переход	Длина волны λ_k , нм	E_i , см ⁻¹	E_k , см ⁻¹	g_k	A (10^8 s^{-1})
1	$1s^2 2p-1s^2 4s$	497.2	14 904	35 012	2	6.918×10^{-2}
2	$1s^2 2p-1s^2 5d$	413,3	14 904	39 094	6	1.090×10^{-1}

При выполнении ЛТР и заселенности уровней в соответствии с распределением Больцмана температура будет зависеть только от отношения интенсивностей и рассчитывается из равенства

$$\Delta \ln \left(\frac{J \cdot \lambda}{A \cdot g} \right) = \ln \left(\frac{J_2}{J_1} \right) + \ln \left(\frac{\lambda_2 A_1 q_1}{\lambda_1 A_2 q_2} \right) = - \frac{E_2 - E_1}{\theta_\lambda}$$

где $\theta_\lambda = 1/\lambda$ – температура, выраженная в обратных сантиметрах. Например, для линий 413.3 и 497.2 нм при $J_2/J_1 = 0.89$, найденного из экспериментального спектра, получим $\theta_\lambda \approx 2200 \text{ см}^{-1}$. Тогда для перехода к температуре в электронвольтах имеем $\theta \approx (1.24 \cdot 10^{-4}) \theta_\lambda = 0.27 \text{ эВ}$, откуда легко найти $T \approx 11600 \cdot \theta \approx 3150 \text{ К}$. На основе рассмотренной методики выполнен анализ других линий Li I: 323.3, 460.3, 610.4 и 670.8 нм. Так пара последних линий дает завышенный результат $\theta \approx 1.2 \text{ эВ}$.

Список литературы

1. M. Cvejić, E. Stambulchik, M.R. Gavrilović, S. Jovičević, N. Konjević. Spectrochimica Acta, Part B 100 (2014) 86–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2014.08.007>
2. A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, NIST ASD Team, NIST Atomic Spectra Database (version 5.1), <http://physics.nist.gov/asd>

А.П. СКРИПНИК, Д.С. СТЕПАНОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПОРТАТИВНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ ДИОДОМ

На основе построенных моделей рассмотрена динамика плазменных и нейтронных потоков в ионно-плазменном диоде с магнитной изоляцией обратных электронов. Приводится конструкция магнитной системы диода на основе постоянных магнитов для устранения влияния обратных электронов на процессы в разрядном промежутке. Дается описание экспериментальной установки и основных ее систем. Проанализированы импульсы высокого напряжения и ионных токов на нейтронообразующей мишени. Нейтронные потоки были измерены с помощью активационного детектора ТПИВН61.

A.P. SKRIPNIK, D.S. STEPANOV, K.I. KOZLOVSKY, E.Y. SHKOLNIKOV

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

PORTABLE NEUTRON GENERATOR WITH A LASER-PLASMA DIODE

Based on the constructed models, the dynamics of plasma and neutron fluxes in an ion-plasma diode with magnetic isolation of reverse electrons is considered. The design of a magnetic diode system based on permanent magnets is given to eliminate the influence of reverse electrons on the processes in the discharge gap. A description of the experimental setup and its main systems is given. Pulses of high voltage and ion currents on a neutron-forming target were analyzed. Neutron fluxes were measured using the TPIVN61 activation detector.

Портативные импульсные нейтронные генераторы (НГ) используются в широком спектре фундаментальных, прикладных исследований и производственных технологиях. Эти устройства генерируют нейтронные потоки в результате реакций синтеза $D(d,n)^3\text{He}$ и $T(d,n)^4\text{He}$, протекающих в насыщенных нейтронообразующих мишенях при их бомбардировке ионами изотопов водорода. Современная востребованность в нейтронных технологиях вызвала разработку новых видов портативных НГ, среди которых большое внимание привлек НГ на лазерно-плазменном ионном диоде [1]. Его потенциальные возможности по наработке нейтронных потоков ставят этот НГ на ведущее место по данному показателю среди портативных НГ. Нарботка плазмы в диоде происходит в воздействия короткоимпульсного лазерного излучения на подложку, насыщенную дейтерием. На катод подается высокое напряжение, под действием которого происходит извлечение ионов дейтерия и их ускорение к нейтронообразующей мишени. Для анализа динамики плазменных потоков использовался код KARAT [2], параметром дискретизации выбрана глубина скин-слоя. Из-за экстремально большой плотности начальной плазмы и появляющихся при этом численных неустойчивостей, в качестве начального условия выбрана конфигурация факела полусферической формы диаметром 3 см.

Значения ионных токов в диоде могут составлять единицы кА. Это может привести к генерации сильных потоков обратных электронов из-за вторичной ионно-электронной эмиссии, и соответственно, закорачиванию промежутка. По этой причине в конструкцию диода введена магнитная система на постоянных магнитах. Расчеты показали полную локализацию вторичного электронного потока, как результат действия магнитной изоляции.

Произведен физический пуск экспериментальной установки, которая содержит генератор импульсных напряжений, вырабатывающий импульсы напряжения 150-450 кВ длительностью 1,5 мкс. Лазерный луч с энергией до 0,7 Дж и длительностью 7 нс подается на циркониевую мишень, насыщенную дейтерием – анод. Характерный размер разрядного промежутка – 3 см. Ионы плазменного факела достигают алюминиевого катода, насыщенного также дейтерием, где происходит ядерная реакция $D(d,n)^3\text{He}$ с образованием нейтронного потока. Разрядный промежуток, а также система магнитной изоляции с магнитным полем 0,4 Тл размещена в вакуумной камере, с давлением 10^{-5} Торр. Импульсы напряжения и токов измерялись с помощью делителей напряжения и поясов Роговского. Для напряжения 230 кВ были зарегистрированы ионные токи на катод величиной до 1,2 кА длительностью 1,5 мкс, что соответствует полученным численным значениям. Нейтронные потоки были измерены с помощью активационного детектора ТПИВН61. Для напряжения 230 кВ поток нейтронов составил $3 \cdot 10^7$ нейтрон/импульс.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 22-29-00508, <https://rscf.ru/project/22-29-00508/>.

Список литературы

1. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I. Neutron Generation in a Plasma Diode with Electrons Insulated by a Constant Magnetic Field // *At. Energy*. 2016. Vol. 119, № 4. P. 258–264.
2. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода KARAT: дис. д-ра физ. мат. наук. ОИВТ РАН и ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, 2011.

А.П. СКРИПНИК, Д.С. СТЕПАНОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРТАТИВНОМ НЕЙТРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ С ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ ИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ

С помощью моделей с упрощенной геометрией были проанализированы процессы, происходящие в ускоряющем промежутке нейтронного генератора с лазерным ионным источником. Приведено описание этих моделей. Проведен расчет зависимости ионного тока от времени для нескольких значений энергии лазера, проанализированы происходящие в ускоряющем промежутке процессы.

A.P. SKRIPNIK, D.S. STEPANOV, K.I. KOZLOVSKY, E.Y. SHKOLNIKOV

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

SIMULATION OF PHYSICAL PROCESSES IN A PORTABLE NEUTRON GENERATOR WITH A LASER-PLASMA ION SOURCE

Using models with simplified geometry, the processes occurring in the accelerating gap of a neutron generator with a laser ion source were analyzed. The description of these models is given. The dependence of the ion current on time for several values of the laser energy is calculated, the processes occurring in the accelerating gap are analyzed.

Портативные импульсные генераторы нейтронов в настоящее время широко используются в различных областях науки и техники. Одним из наиболее важных параметров подобных генераторов является число испускаемых за импульс нейтронов. Генератор нейтронов, в котором в качестве источника ионов используется плазма, образующаяся при воздействии мощного импульса лазерного излучения на твердотельную мишень, может испускать нейтронные импульсы высокой интенсивности и иметь сравнительно небольшие размеры.

Внутренний объем нейтронного генератора представляет собой две мишени – плазмообразующую и нейтронообразующую, разделенные между собой вакуумным промежутком и насыщенные дейтерием. При воздействии мощного импульса лазера на плазмообразующую мишень, на ней возникает сгусток лазерной плазмы, распространяющийся в вакуумный зазор. При этом к зазору прикладывается напряжение порядка нескольких сотен киловольт. С поверхности плазменного сгустка извлекаются ионы дейтерия и материала подложки и ускоряются в направлении нейтронообразующей мишени. При столкновении ускоренного потока дейтронов с атомами дейтерия, импрегнированными в нейтронообразующую мишень, происходит ядерная реакция $D(d,n)^3He$.

Особенностью работы подобного генератора является динамический характер происходящих в нем процессов – по мере распространения плазмы в вакуумном зазоре, его длина сокращается, что влечет за собой увеличение тока ускоренных частиц в соответствии с законом Чайлда-Ленгмюра. При этом по мере извлечения ионов из плазмы и уменьшения ее концентрации, ее эмиссионная способность уменьшается. Для исследования этих процессов, были построены упрощенные модели работы данного устройства, позволяющие оценить зависимость ионных токов от времени.

Были рассмотрены две модели – цилиндрическая, в которой мишень и поверхность лазерной плазмы имеют цилиндрическую форму, и сферическая, в которой они имеют форму полусфер. Это позволило использовать для расчета величины тока, ограниченного объемным зарядом, аналитические выражения закона Чайлда-Ленгмюра. Для оценки снижения эмиссионной способности плазмы используется ее представление в виде парциального тока ионов [1], который зависит от концентрации плазмы и скорости ее разлета. Используя начальные данные о скорости разлета и числе частиц в плазменном сгустке [2], можно вычислить величины токов ускоренных ионов дейтерия в различные моменты времени, по мере расширения лазерной плазмы в зазоре.

В результате расчета с помощью данных моделей, были получены зависимости ионных токов от времени. Для энергии лазера 75 мДж и при ускоряющем напряжении 450 кВ были получены импульсы ионного тока амплитудой 200 А в цилиндрической модели и 250 А в сферической модели, с длительностью на полувывсоте около 0,15 мкс. Показано, что при совпадении в некоторый момент времени величин парциального тока и ионного тока в промежутке, ионный ток достигает своего максимального значения. Это значение зависит от начальных условий расчета – начального числа частиц плазмы, определяемого энергией импульса лазера и начальным радиусом плазмы, зависящим от времени задержки между срабатыванием лазера и включением высокого напряжения. При увеличении энергии лазера возможно значительное увеличение получаемых токов, при этом минимальная длина ускоряющего промежутка также сокращается, что может привести к снижению электрической прочности промежутка.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00508, <https://rscf.ru/project/22-29-00508/>.

Список литературы

1. Агафонов А.В., Тараканов В.П., Кладко С.Г. и др. // Теплофизика высоких температур. 2017. т. 55, № 5. с. 692-697.
2. Шиканов А.Е., Вовченко Е.Д., Козловский К.И. // Атомная энергия. 2015. т. 119, № 4. с. 210–214.

Д.С. СТЕПАНОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.П. СКРИПНИК, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СИСТЕМА МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИОННОГО ДИОДА ПОРТАТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ

Рассмотрена разработка системы магнитной изоляции лазерно-плазменного ионного диода. Итоговая конструкция магнитной системы должна обеспечивать полную изоляцию обратных электронов, а также значительно увеличивать долю оседающих на нейтронообразующей мишени ионов и электропрочность ускоряющего промежутка. Измерения распределения магнитного поля внутри ускоряющего промежутка изготовленной системы магнитной изоляции показали хорошую точность его реализации. Средняя величина различий с моделью составляет ~ 3%.

STEPANOV D.S., KOZLOWSKI K.I., SKRIPNIK A.P., SHKOLNIKOV E.Y.

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

MAGNETIC ISOLATION SYSTEM FOR A LASER-PLASMA ION DIODE OF A PORTABLE NEUTRON GENERATOR

The development of a magnetic isolation system for a laser-plasma ion diode is considered. The final design of the magnetic system should provide complete isolation of reverse electrons and significantly increase the fraction of ions deposited on the neutron-producing target and the electrical strength of the accelerating gap. Measurements of the magnetic field distribution inside the accelerating gap of the fabricated magnetic insulation system showed good accuracy of its implementation. The average difference with the model is ~3%.

В среде портативных импульсных нейтронных генераторов (НГ) наибольшее распространение получили вакуумные нейтронные трубки и генераторы на камере плазменного фокуса. Их перспективным аналогом могут стать портативные НГ на лазерно-плазменном ионном диоде с магнитной изоляцией [1]. Однако, на настоящий момент остается нерешенной проблема существенного возрастания обратного электронного тока вследствие ионно-электронной эмиссии с поверхности нейтронообразующей мишени, вызывающего замыкание ускоряющего промежутка. Эту проблему должна решить новая система магнитной изоляции, прототипом которой послужил диод, описанный в работе [1]. Разработка магнитной системы лазерно-плазменного ионного диода осуществляется с помощью двух инструментов: CST MS – программы численного моделирования распределения магнитных полей и электродинамическом коде KARAT [2], позволяющем рассматривать разлет плазмы и обратных электронов во внешних полях.

Итоговый вариант конструкции лазерно-плазменного ионного диода представлен на рис. 1.

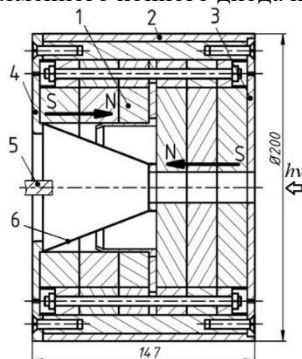


Рис. 1. Система магнитной изоляции лазерно-плазменного ионного диода: 1 – магнитный блок, 2, 3 – элементы магнитопровода, 4 – лазерная мишень, 5 – нейтронообразующая мишень.

Разработана новая система магнитной изоляции лазерно-плазменного ионного диода. Изготовленный ионный диод должен обеспечивать полную изоляцию обратных электронов, а также увеличить долю оседающих на нейтронообразующей мишени ионов и электропрочность ускоряющего промежутка. Измерение магнитного поля показало его хорошее соответствие расчетному распределению. Таким образом, можно ожидать успешной экспериментальной апробации данного диода, которая покажет возросший относительно предыдущих конструкций ионный ток.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00508, <https://rscf.ru/project/22-29-00508/>.

Список литературы

1. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I. Neutron Generation in a Plasma Diode with Electrons Insulated by a Constant Magnetic Field // At. Energy. 2016. Vol. 119, № 4. P. 258–264.
2. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода KARAT: дис. д-ра физ. мат. наук. ОИВТ РАН и ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, 2011.

К.Ю. ВАГИН¹, Т. В. МАМОНТОВА^{1,2}, С.А. УРЮПИН^{1,2}

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ СКИН-ЭФФЕКТ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ, ОБРАЗОВАННОЙ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Изучены особенности проникновения электромагнитного излучения в плазму, образованную при многофотонной ионизации инертных газов. Изучено влияние неоднородности плотности фотоэлектронов на структуру поля в плазме и коэффициент поглощения в режиме высокочастотного скин эффекта. Показано, что эффект Рамзауэра-Таунсенда приводит к увеличению поглощения.

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

HIGH-FREQUENCY SKIN EFFECT IN NONHOMOGENEOUS PLASMA, PRODUCED BY MULTIPHOTON IONIZATION OF INERT GAS ATOMS

The features of electromagnetic radiation penetration into plasma formed during multiphoton ionization of inert gases have been studied. The influence of photoelectron density inhomogeneity on the field structure in plasma and the absorption coefficient in the high-frequency skin effect mode has been investigated. It was shown that the Ramsauer-Townsend effect leads to an increase in absorption.

Рассмотрено взаимодействие монохроматической электромагнитной волны с неоднородной плазмой, образованной при многофотонной ионизации атомов инертного газа. Функция распределения фотоэлектронов по скоростям в такой плазме имеет вид узкого пика со средним значением, отвечающим скорости v_0 , приобретенной в процессе ионизации. Принято, что плазма занимает полупространство $z > 0$. При этом в слое $0 < z < L$ плотность фотоэлектронов имеет изменяется по закону zn_0/L , а затем остается равной n_0 .

Используя уравнения Максвелла и кинетическое уравнение с интегралом столкновений, описывающим релаксацию по направлениям скорости фотоэлектронов без изменения их энергии, получены общее выражение для электрического поля в плазме и коэффициент поглощения. Поле и коэффициент поглощения исследованы в случае, когда частота падающего излучения ω значительно меньше плазменной частоты ω_L в области постоянной плотности фотоэлектронов, но значительно больше частоты столкновений ν фотоэлектронов с нейтральными атомами инертного газа. Если ширина слоя переменной плотности L меньше δ – глубины скин-слоя при высокочастотном скин эффекте, то коэффициент поглощения пробного излучения описывается выражением, полученным ранее в работе [1] в предположении о скачкообразном изменении плотности электронов на границе. При увеличении толщины неоднородного слоя до значений δ_c , при которых расстояние до точки критической плотности меньше, чем длина волны падающего излучения, глубина проникновения поля и коэффициент поглощения растут как $\sim L^{1/3}$. Дальнейшее увеличение толщины неоднородного слоя приводит к тому, что излучение практически полностью поглощается внутри неоднородного слоя, а глубина проникновения поля сравнима с расстоянием до точки критической плотности. Установлено, что из-за эффекта Рамзауэра-Таунсенда коэффициент поглощения возрастает вследствие увеличения эффективной частоты столкновений $\nu_{\text{eff}} = \nu(1 + \alpha/3)$, где величина α зависит от типа инертного газа и средней энергии фотоэлектронов.

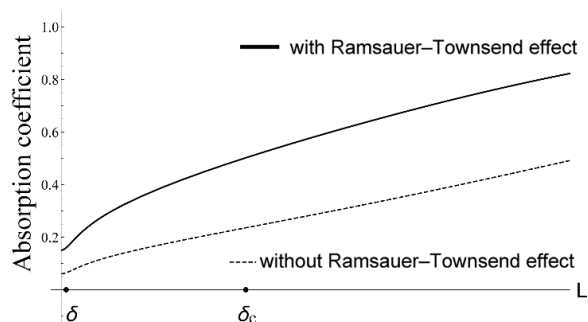


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от толщины неоднородного слоя для плазмы, образованной при ионизации ксенона, когда средняя энергия фотоэлектронов 2.87 eV.

Список литературы

1. K. Yu. Vagin, T. V. Mamontova, S.A. Uryupin. Impact of electron collisions on the skin effect in a photoionized inert gas plasma, Physical Review A, 102, 023105 (2020)

И.П. ЕЛИН, Н.В. ЖИДКОВ
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ «ПЕРВИЧНАЯ-ВТОРИЧНАЯ МИШЕНЬ» ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5»

Исследована принципиальная возможность создания неравновесного ионного потока с последующей кинетической генерацией нейтронов в условиях интенсивности лазерного излучения на мишени менее 10^{18} Вт/см². Проведен эксперимент в схеме «первичная-вторичная мишень» на одном канале установки «Искра-5» [1] с применением слоя CD₂ в обеих мишенях по схеме backwards proton acceleration (BPA). Интенсивность излучения на мишени составила на уровне 10^{16} Вт/см². Измерен нейтронный выход в полусфере за вторичной мишенью $(23 \pm 2) \cdot 10^5$ нейтронов.

I.P. YELIN, N.V. ZHIDKOV
RFNC-VNIIEF, Sarov

APPLICATION OF “PITCHER-CATCHER” SCHEME FOR NEUTRON GENERATION AT “ISKRA-5” LASER FACILITY

Fundamental possibility of nonequilibrium ion flux generation with following neutron generation in conditions of laser intensity of less than 10^{18} Watt/cm² is researched. An experiment with “pitcher-catcher” scheme is conducted at one channel of “Iskra-5” [1] laser facility with application of CD₂ layer in both targets and backwards proton acceleration (BPA) scheme. Laser intensity at target was up to level of 10^{16} Watt/cm². Neutron yield in hemisphere behind the catcher target is measured as $(23 \pm 2) \cdot 10^5$ neutrons.

В последние годы было показано, что при фокусировке мощного ($I\lambda^2 > 10^{18}$ (Вт/см²)·мкм²) лазерного излучения на поверхности твердого тела возникают быстрые частицы и, в частности, протоны с энергией, превышающей несколько МэВ. В 2013 г. появились сообщения [2] с установки PALS о генерации DD нейтронов при облучении лазером с интенсивностью $I\lambda^2 \sim 5 \cdot 10^{16}$ (Вт/см²)·мкм². При этом выход нейтронов превышал 10^8 нейтронов за выстрел.

Проведен эксперимент на установке «Искра-5» в постановке «первичная-вторичная мишень» по методу облучения ионным факелом BPA, когда поток ионов летит по нормали от относительно толстой мишени в сторону лазерного излучения. Применялся один канал установки на 1ω ($\lambda=1,315$ мкм). Основной методикой измерения нейтронного выхода в данной постановке стала активационная методика на базе реакции $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$. Кроме нее в опыте для нейтронных измерений применялись: активационная методика на базе реакции $^{115}\text{In}(n,\beta,\gamma)^{116}\text{Sn}$, методика затянутой регистрации, времяпролетная методика.

Первичная мишень представляла собой медную пластинку с тонким слоем CD₂ в несколько микрон, нанесенным на нее методом лазерной абляции. Вторичная мишень представляла собой тиск из стекла диаметром $(5,0 \pm 0,1)$ см, на которую методом накапывания наносился слой CD₂ не менее 70 микрон. Вторичную мишень, диаметром 5 см, установили соосно первичной на расстоянии $(6,6 \pm 0,2)$ см. Лазерное излучение было направлено под углом 30° к первичной мишени Индиевый индикатор, диаметром 5 см и толщиной 1,1 см, установили сразу за вторичной мишенью для увеличения эффективного сечения области активации. Схема эксперимента показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема эксперимента

Лазерная энергия в эксперименте составила 450 Дж, интенсивность излучения на уровне 10^{16} Вт/см². В полусфере за вторичной мишенью нейтронный выход составил $(23 \pm 2) \cdot 10^5$ нейтронов. Остальные методики получили нейтронный выход, соответствующий изотропному разлету количеством $(2 \pm 1) \cdot 10^8$ н/выстрел. Эта величина не является показательной из-за анизотропии разлета. Были сделаны выводы о принципиальной возможности получения нейтронного выхода в данной схеме эксперимента при интенсивностях на уровне 10^{16} Вт/см².

1. В.И. Анненков, В.А. Багрецов, В.Г. Безуглов и др., Импульсный лазер мощностью 120 ТВт «Искра-5», Квантовая электроника, 18:5, (1991), С. 536–537.
2. . Krása, D. Margarone, D. Klír, et.al., High-currents of multi-MeV protons and fusion neutrons produced by 3-TW sub-nanosecond laser beam, 40th EPS Conference on Plasma Physics, O5.212, (2013)

О.А. БАШУТИН, П.П. СИДОРОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ИЗ РАЗРЯДА ТИПА "ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС"

Представлено исследование аксиальных плазменных потоков, генерируемых в пинчевом разряде типа "плазменный фокус" в аргоне. Выявлено отличие плазменных потоков, наблюдаемых в оптимальных режимах работы установки с образованием плазменного фокуса, от потоков, формирующихся в режимах без образования плазменного фокуса.

O.A. BASHUTIN, P.P. SIDOROV

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

INVESTIGATION OF PLASMA FLOWS FROM THE "PLASMA FOCUS" TYPE DISCHARGE.

A study of axial plasma flows generated in a pinch discharge of the "plasma focus" type in argon is presented. The difference between the plasma flows observed in the optimal operating modes of the installation with the formation of a plasma focus and the flows formed in the modes without the formation of a plasma focus was revealed.

Уже на протяжении десятков лет не спадает интерес к плазменным установкам пинчевого типа, реализующим явление "плазменный фокус". Отличительной чертой такого типа установок является возможность генерации мощных импульсов рентгеновского, нейтронного и других излучений, а также формирование высокоскоростных плазменных потоков, находящихся всё более широкое применение в различных областях науки и техники, от моделирования комплексного воздействия на материалы до моделирования астрофизических объектов[1-3].

В работе представлены исследования плазменных потоков, генерируемых в аксиальном направлении на плазмофокусной установке ПФМ-72М (НИЯУ МИФИ) с электродной системой полусферического типа [4]. В качестве накопителя энергии использовалась конденсаторная батарея емкостью 12 мкФ, заряжаемая до напряжения 24 кВ. При этом амплитуда разрядного тока достигала 300 кА с периодом разряда 5.2 мкс. В качестве рабочего газа использовался аргон при давлении 1 торр. Ток разряда контролировался поясом Роговского. Режим формирования плазменного фокуса контролировался по появлению особенности на кривой разрядного тока. Для регистрации плазменных потоков использовался многосеточный зонд, располагавшийся на конце времяпролетной трубы на расстоянии 30 см от анода. Схема измерений и пример полученных осциллограмм показаны на рис.1.

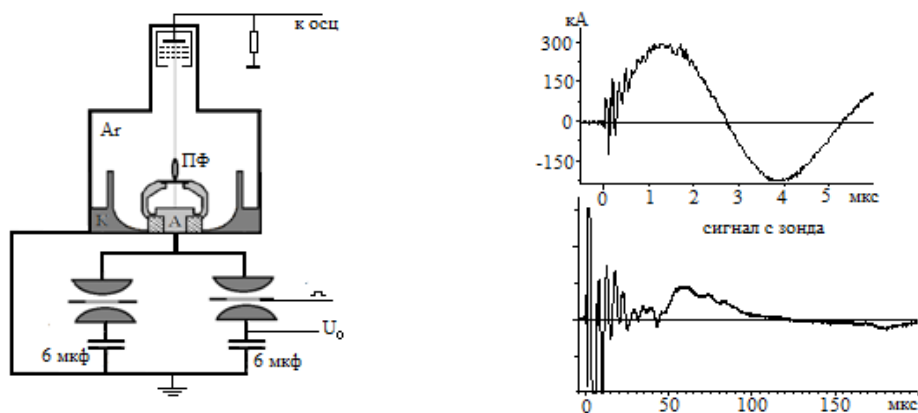


Рис.1. Схема измерений (слева) и примеры осциллограмм тока разряда и сигнала с зонда

Выявлено отличие аксиальных плазменных потоков, наблюдаемых в оптимальных режимах работы установки с образованием плазменного фокуса от потоков, формирующихся в режимах без его образования. В первом случае регистрируются две группы ионов: более быстрая, длительностью 5 мкс и средней скоростью $v_i \sim (2-3) \cdot 10^6$ см/с и более медленная длительностью до 50 мкс со средней скоростью $(3-5) \cdot 10^5$ см/с. Во втором случае наблюдается лишь медленная группа ионов со средней скоростью $(2-3) \cdot 10^5$ см/с. Быстрая группа ионов в разрядах с образованием плазменного фокуса может являться следствием формирования кумулятивной струи при симметричном сжатии нецилиндрической токово-плазменной оболочки к оси электродной системы, тогда как медленная группа ионов видимо принадлежит самой расширяющейся токово-плазменной оболочке.

Список литературы

1. Mikhailova G., Antonova L., Borovitskaya I., et al. // Phys. Status Solidi C 10(4), 689 (2013).
2. Krauz V., Myalton V., Vinogradov V., et al. // Phys. Scr. 161, 1 (2014).
3. Seyyedhabashy M., Tafreshi M., Shafiee S., et al. // Nuclear Engineering and Technol. 52 (2020) 827-834.
4. Сидоров П.П., Башутин О.А. и др. // Матер. X Росс. конф. "Совр. ср-ва диагн. плазмы" 2016, с. 112-115.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕННОМ ФОКУСЕ

Проводилось изучение взаимодействия мощных плазменных потоков плазменного фокуса с поверхностью металлов. На поверхности стальных образцов наблюдается возникновение микрокапель неправильной формы размерами 10-40 мкм. Воздействие токовой структуры разряда приводит к появлению микроотверстий диаметром 0,1-5 мкм.

D.L. KIRKO, P.P. SIDOROV, O.A. BASHUTIN, A.S. SAVJOLOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF PLASMA ON METALIC SURFACE IN PLASMA FOCUS

The interaction of powerful plasma fluxes of plasma focus with the surface of metals was studied. On the surface of steel samples the appearance of irregularly shaped micro droplets with the size 10-40 μm was observed. The impact of current discharge structure leads to the appearance of micro-holes with the diameter 0.1-5 μm .

Установка типа плазменный фокус является импульсным источником рентгеновского излучения и интенсивных плазменных потоков, возникающих при взаимодействии плазмы с поверхностями электродов, и на стадии распада Z-пинча [1,2]. В качестве вакуумной камеры используется дюралевый объем кубической формы при длине ребра 120 мм, толщина стенки 20 мм. Разрядное устройство плазменного фокуса содержит центральный медный анод диаметром 30 мм и длиной 28 мм, в верхней части которого находится вольфрамовая вставка в виде диска с диаметром 12 мм и высотой 3 мм. Снаружи данного катода расположен медный катод в виде 8 цилиндров (длина каждого 40 мм), помещенных по кругу диаметром 62 мм. Характерное зарядное напряжение конденсаторной батареи было в диапазоне 22-23 кВ, ток разряда 330-345 кА, период тока разряда 4,8 мкс. Система откачки содержит форвакуумный и турбомолекулярный насосы для откачки до давления 10^{-5} Тор и систему для наполнения объема аргоном в диапазоне 0,1-150 Тор.

Возникновение плазмы происходит при включении разрядного устройства и поверхностного пробоя изолятора плазменного фокуса между анодом и катодом. Это приводит к появлению токовой плазменной оболочки, которая начинает движение в межэлектродном пространстве. После огибания анода данная токовая оболочка сходится вблизи оси камеры, образуя плазменный фокус.

Исследование поверхности образцов из стали, молибдена, вольфрама и меди проводилось с помощью микроскопов Hitachi TM1000 и VEGA 3 SEM. Образцы из стали (Ст 45) были закреплены в центре анода. На поверхности обычно располагались образования неправильной формы “капли” размером около 10-40 мкм, возникающие при расплавлении поверхности образца во время взаимодействия плазмы пинча с электродом. Элементный состав данных образований: железо 70-85%, алюминий 15-30%. Содержание алюминия объясняется испарением изолятора из корунда, в состав которого входит алюминий. На данной поверхности также присутствуют микроотверстия с размерами 0,1-5 мкм.

Для изучения взаимодействия плазмы фокуса с поверхностями металлов образцы закреплялись также в держателе на расстоянии около 40 мм от плазмы. На поверхности образца из молибдена, как правило, располагается большое количество микро капель размерами 0,1-3 мкм. Элементный состав данных капель – алюминий. Форма этих капель близка к сферической или неправильная.

Список литературы

1. Башутин О.А., Алхимова М.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Савелов А.С., Саранцев С.А. // Физика плазмы, 2013, Т. 39, № 11, с.1006-1016.
2. Kirko D.L., Bashutin O.A., Sidorov P.P., Savjолоv A.S. // J. Phys.: Conf. Series, 2018, V.1115, p.022010 (6pp).

В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ¹, Г.Б. РАГИМХАНОВ¹, Д.В. ТЕРЕШОНОК², П.Х. ОМАРОВА¹, З.Р. ХАЛИКОВА¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ИОНИЗИРОВАННОМ АРГОНЕ В ПРОМЕЖУТКЕ С ГЕОМЕТРИЕЙ «ОСТРИЕ - ПЛОСКОСТЬ»

На основе двумерной осесимметричной диффузионно-дрейфовой модели выполнено исследование влияния начальных условий на особенности формирования и развития анодонаправленной волны ионизации между двумя электродами с геометрией промежутка «острие-плоскость» в аргоне при атмосферном давлении.

V.S. KURBANISMAILOV¹, G.B. RAGIMKHANOV¹, D.V. TERESHONOK², Z.R. KHALIKOVA¹, P.KH. OMAROVA¹

¹ Dagestan State University, Makhachkala, Russia,

² Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow, Russia

FEATURES OF THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE IONIZATION WAVE IN PRELIMINARY IONIZED ARGON IN THE INTERMEDIATE WITH GEOMETRY «PIN-TO-PLATE»

Based on a two-dimensional axisymmetric diffusion-drift model, a study was made of the influence of initial conditions on the formation and development of an anode-directional ionization wave between two electrodes with a tip-to-plane gap geometry in argon at atmospheric pressure.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию импульсных объемных разрядов (ОР), многие вопросы, связанные с физикой формирования начальных стадий вызывают научные дискуссии [1-3].

В настоящей работе в условиях равномерной предварительной ионизации аргона при атмосферном давлении выполнено расчетно-теоретическое исследование начальной стадии формирования импульсного разряда в аргоне в межэлектродном промежутке с геометрией «острие - плоскость». Острие (катод) представляло собой прямой цилиндр с радиусом 1 мм и длиной 1 см, расстояние от острия до плоскости 8.5 мм. Моделирование выполнено в двумерной осесимметричной постановке с начальной концентрацией электронов и атомарных ионов 10^8 см^{-3} во всей расчетной области. Напряжение на электродах в течение всего времени расчета составляло 5 кВ. Газоразрядная плазма рассматривается как сплошная многокомпонентная среда, состоящая из нейтральных атомов (Ar), электронов (e), возбужденных атомов (Ar^*) с энергией возбуждения 11.5 eV, атомарных (Ar^+) и молекулярных (Ar_2^+) ионов. В частности рисунке 1a,b приведены характерные распределения концентрации электронов (рис. 1a) и молекулярных ионов аргона Ar_2^+ (рис. 1b) в промежутке для различных моментов времени: красная линия $r=0 \text{ см}$; синяя линия $r=0,1 \text{ см}$. Показано, что на стадии формирования, в результате реакции $\text{Ar} + \text{Ar} + \text{Ar}^+ \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}_2^+$, концентрация молекулярных ионов аргона Ar_2^+ существенно превосходит концентрацию атомарных ионов Ar^+ , что обусловлено слабым разрушением Ar_2^+ ввиду отсутствия нагрева газа. Установлено, что в разрядном промежутке на времена до 200 нс формируется анодонаправленная волна ионизации. При этом, несмотря на сильную неоднородность электрического поля, скорость анодонаправленной волны остается постоянной и равной $5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$.

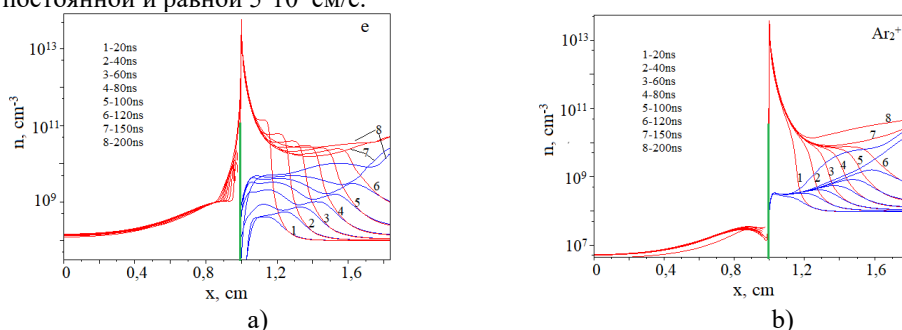


Рис. 1. Характерные зависимости концентрации электронов (a)

и молекулярных ионов аргона (b): синяя линия – $r=0 \text{ см}$; красная линия – $r=0,1 \text{ см}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-01043А)

Список литературы

1. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов Москва, 1991. С. 224
2. Tarasenko V.F., Baksht E. and Burachenko A.G. // Technical Physics Letters. 2010. V.36, №4. P.375-78.
3. Naidis G.V, Tarasenko V.F, Babaeva N.Yu and Lomaev M.I. // Plasma Sources Science and Technology. 2018. V. 27, №1. P. 013001

К.И. АЛМАЗОВА¹, А.Н. БЕЛОНОГОВ¹, В.В. БОРОВКОВ¹, В.С. КУРБАНИСМАИЛОВ²,
П.Х. ОМАРОВА², Г.Б. РАГИМХАНОВ², Д.В. ТЕРЕШОНОК³, А.А. ТРЕНЬКИН¹, З.Р. ХАЛИКОВА²

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ В ГЕОМЕТРИИ ПРОМЕЖУТКА «ОСТРИЕ-ПЛОСКОСТЬ»

Исследованы характерные особенности формирования ударных волн и их динамика. С использованием метода теневого фотографирования исследован искровой разряд в промежутке острие (катод) – плоскость длиной 1.5 мм в интервале времени от момента пробоя до 100 нс. Подтверждено, что с первых наносекунд после пробоя канал разряда представляет собой совокупность большого числа микроканалов. Исследованы характерные особенности формирования и динамика цилиндрической ударной волны, создаваемой при расширении канала разряда.

K.I. ALMAZOVA¹, A.N. BELONOGOV¹, V.V. BOROVKOV¹, V.S. KURBANISMAILOV²,
P.Kh. OMAROVA², G.B. RAGIMKHANOV², D.V. TERESHONOK³, A.A. TRENKIN¹, Z.R. KHALIKOVA²

¹Russia/Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

³Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow

SHOCK WAVES IN THE INITIAL PHASE OF A MICRO-STRUCTURED SPARK DISCHARGE IN AIR IN THE GEOMETRY OF THE “PIN-TO-PLATE” GAP

The characteristic features of the formation of shock waves and their dynamics are investigated. Using the method of shadow photography, a spark discharge in the gap between the tip (cathode) and a plane 1.5 mm long was studied in the time interval from the moment of breakdown to 100 ns. It is confirmed that from the first nanoseconds after the breakdown, the discharge channel is a combination of a large number of microchannels. The characteristic features of the formation and dynamics of a cylindrical shock wave created during the expansion of the discharge channel are studied.

Высоковольтные импульсные разряды в плотных газах часто встречаются на практике и активно изучаются на протяжении длительного времени. Относительно недавно с применением метода лазерного зондирования и основанных на нем теневых и интерференционных методиках высокого разрешения было установлено наличие микроструктуры искрового разряда в воздухе в промежутке острие–плоскость, когда уже с первых наносекунд канал представляет собой совокупность большого числа микроканалов [1-3].

В данной работе с использованием метода теневого фотографирования исследован искровой разряд в промежутке острие (катод) – плоскость длиной 1.5 мм в воздухе атмосферного давления.

Динамика разряда на временах от момента пробоя до 100 нс, включает развитие микроканалов от острия вглубь разрядного промежутка, расширение микроканалов, формирование общего фронта цилиндрической ударной волны искры и его радиальное движение (рис. 1).

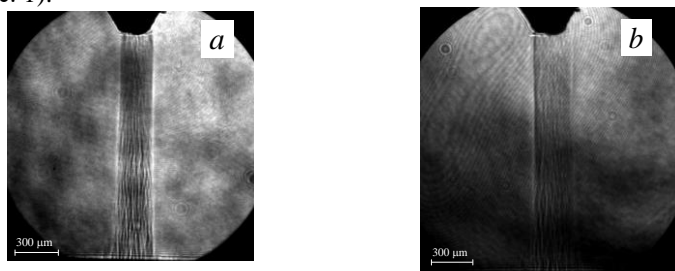


Рис. 1. Тенеграммы разряда в одном импульсе в моменты времени 18 ns (a) и 23 ns (b), Электрод–острие находится сверху.

Установлено, что динамика цилиндрической ударной волны, включает фазу роста скорости ударной волны длительностью около 5 нс до значения около 5 км/с в момент времени ≈ 20 нс и последующего медленного спада.

Оценка температуры газа в канале разряда на временах от 10 до 50 нс дает значения в интервале от 10 до 20 кК.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-01043А).

Список литературы

1. Алмазова К.И., Белоногов А.Н., Боровков В.В., Курбанисмаилов В.С., Омарова П.Х., Рагимханов Г.Б., Тренькин А.А., Терешонок Д.В., Халикова З.Р. // ФП. 2021. Т. 47, № 1.
2. Parkevich E.V., Medvedev M.A., Khirianova A.I., Ivanenkov G.V., Selyukov A.S., Agafonov A.V., Shpakov K.V., Oginov A.V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28, P. 125007.
3. Trenkin A.A., Almazova K.I., Belonogov A.N., Borovkov V.V., Gorelov E.V., Morozov I.V., Kharitonov S.Yu. // Technical Physics. 2020. V. 65, № 12. P. 1948.

Секция
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА,
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И НАНОСИСТЕМ

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., профессор Менушенков
Алексей Павлович

Секретарь секции

– к.ф.-м.н., Кузнецов Алексей
Владимирович

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8020
E-mail: AVKuznetsov@mephi.ru

Б.М. АБДУРАХМАНОВ, М.Ш. КУРБАНОВ, У.М. НУРАЛИЕВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

НОВЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА МИКРО И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАНА И МИКРОКРЕМНЕЗЕМА

Предлагается метод синтеза тонкодисперсных порошков карбида кремния с использованием микрокремнезема техногенных пылевых отходов производства технического кремния или ферросилиция и природного газа. Показана возможность синтеза порошков SiC различных политипов. Определены основные характеристики частиц микрокремнезема и синтезированных на его основе SiC.

B.M. ABDURAKHMANOV, M.SH. KURBANOV, U.M. NURALYEV

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies AS RUz, Tashkent, Uzbekistan

A NEW METHOD FOR THE SYNTHESIS OF MICRO AND NANOSIZED SILICON CARBIDE POWDERS USING MICRO SILICA

A method is proposed for the synthesis of finely dispersed silicon carbide powders using microsilica-technogenic dust waste from the production of technical silicon or ferrosilicon and natural gas. The possibility of synthesizing SiC powders of various polytypes is shown. The main characteristics of microsilica particles and SiC synthesized on its basis are determined.

Новым направлением в технологии синтеза карбида кремния (SiC), отвечающим требованиям ресурсосбережения, является применение микрокремнезема (МКЗ). МКЗ является наряду с газообразной двуокисью углерода одним из главных видов крупнотоннажных техногенных отходов электродугового производства технического кремния и ферросилиция.

Использование МКЗ в качестве кремнеземсодержащего сырья и газообразного метана в качестве углеродистого восстановителя совместно или вместо традиционно применяемого нефтяного кокса для синтеза SiC позволяет уменьшить себестоимость материала и открывает перспективы для управляемого регулирования свойств этого продукта.

Синтез микро и нанопорошков SiC проводился в печи сопротивления при температурах 1600-1900°C с использованием специально разработанного нами устройства для подачи части углеродистого восстановителя в реакционную зону печи в газообразном состоянии. Предложен новый метод синтеза SiC, согласно которому МКЗ помещают в многоярусные лодочки, которые устанавливают в трубчатый реакционный объем, размещенный в печи сопротивления с возможностью регулируемой подачи в него природного газа на 94% состоящего из метана. Для интенсификации реакции взаимодействия метана с МКЗ метан на входе в реакционный объем подвергают диссоциации в регулируемо нагреваемой форкамере, внутренние стенки которой футерованы никелем. Не прореагировавший метан и отходящие газы дожигают с использованием выделяемого тепла для нагрева объема форкамеры.

Известно, что разные модификации кристаллов SiC мало отличаются по значениям многих параметров, так как фактически представляют собой одинаковые слои кремния и углерода, только составленные в несколько отличном порядке, что затрудняет их идентификацию по политипу. Эти трудности преодолеваются при использовании метода комбинационного рассеяния, который позволяет, за счет своей чувствительности к длительности кратных периодов в кристаллической решетке, четко фиксировать и различать линии, соответствующие определенному политипу монокристаллов SiC. Наряду с рентгеновской дифрактометрией, именно этот метод был применен нами для анализа синтезированных порошков.

Спектры комбинационного рассеяния SiC, полученные с помощью In Via Raman спектрометра (Renishaw) на длинах волн $\lambda 532$ и $\lambda 785$ нм, показывают, что пики на спектрах комбинационного рассеяния, соответствующие SiC, наблюдаются на всех четырех участках исследуемой поверхности синтезированных порошков SiC.

На основе анализа спектров рентгеновского дифрактометра и комбинационного рассеяния полученных порошков установлено, что с использованием МКЗ и природного газа могут быть синтезированы 4H, 6H и 3C политипы SiC. Определены основные морфологические и размерные характеристики частиц МКЗ и синтезированных на его основе SiC. Показано, что частицы МКЗ имеют размеры от нескольких нанометров до нескольких микронов, но большая их часть (около 65%) представлена частицами от 100 до 400 нм. Размеры частиц SiC варьируются в достаточно широком диапазоне от нескольких десятков нанометров до нескольких сотен микронов. Предложенный метод синтеза SiC можно отнести одновременно к ресурсосберегающим и экологически оправданным технологиям. Это дает основания полагать, что предлагаемая технология будет иметь хорошие перспективы для практического применения.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ НА КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВТСП КОМПОЗИТОВ

Рассмотрено влияние облучения стопки из 10 образцов ВТСП-лент протонами с энергией 6 МэВ и с флюенсом $5.0 \times 10^{15} \text{ см}^2$. Показано, что критический ток сверхпроводника падает только в первом слое стопки ВТСП-лент, а величина критической температуры для этого слоя отличается менее чем на 0,5% по сравнению с необлучённой лентой. Сделан вывод, что в реальных системах ВТСП-ленты могут быть легко защищены от излучения с данными параметрами.

D.A. ABIN, M.A. OSIPOV, A.S. STARIKOVSKII, I.A. RUDNEV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

INFLUENCE OF PROTON IRRADIATION ON THE CRITICAL PARAMETERS OF HTS COMPOSITES

The influence of irradiation of stacks of 10 samples of HTSC tapes with protons with an energy of 6 MeV and with a fluence of $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^2$ is considered. It is shown that the critical current of the superconductor drops only in the first layer of a stack of HTS tapes, and the value of the critical temperature for this layer differs by less than 0.5% compared to the non-irradiated tape. It is concluded that, in real systems, HTS tapes can be easily shielded from radiation with the given parameters.

Высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) композитные ленты второго поколения – перспективные материалы для разработки источников высоких магнитных полей, в том числе для ускорителей и токамаков, где сверхпроводники могут подвергаться длительному воздействию радиационного излучения. Такое воздействие приводит к появлению дефектов в сверхпроводниках, наличие которых может приводить как к снижению токонесущей способности ВТСП вследствие деградации сверхпроводящего слоя, так и к увеличению, вследствие образования дополнительных центров пиннинга для вихрей магнитного поля.

Было проведено облучение протонами с энергией 6 МэВ стопки из 10 ВТСП-лент с флюенсом $5.0 \times 10^{15} \text{ см}^2$ (рис. 1). Для исследований использовалась промышленная ReBCO (Re – редкоземельный элемент) ВТСП лента SuperOxс двусторонним медным покрытием толщиной 20 мкм. Показано, что критический ток сверхпроводника падает только в первом слое стопки ВТСП-лент, а величина критической температуры для этого слоя отличается менее чем на 0,5% по сравнению с необлучённой лентой. Сделан вывод, что в реальных системах ВТСП-ленты могут быть легко защищены от излучения с данными параметрами.

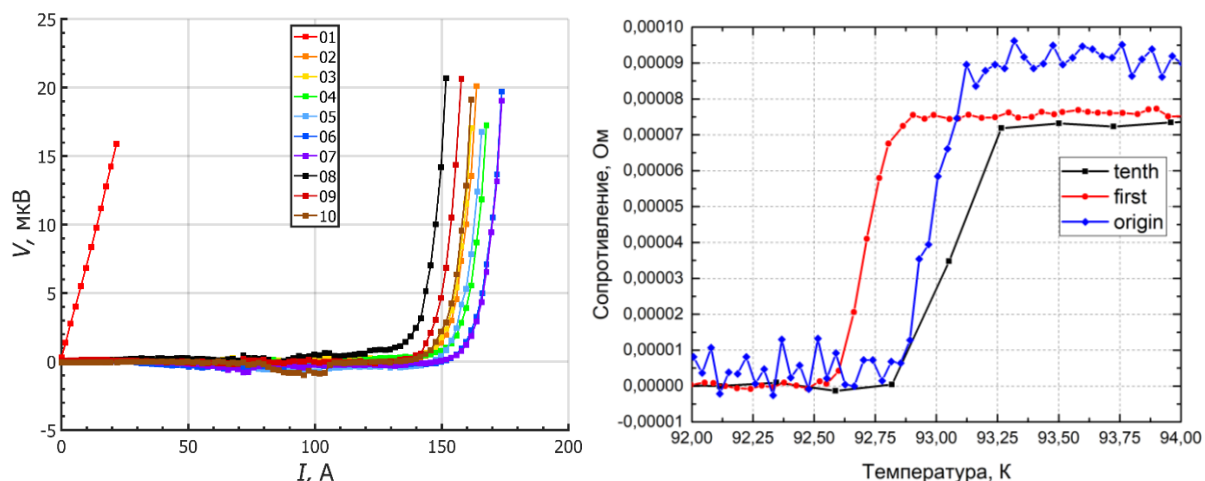


Рис. 1. Слева – вольтамперные характеристики ВТСП лент в стопке. На легенде указан номер ленты, начиная с верхней. Справа – Зависимость сопротивления от температуры для 3 образцов ленты – десятой ленты в стопке (tenth), верхней ленты в стопке (first) и исходной ленты (origin).

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2020-0035) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. (Д.А. Абин, М.А. Осипов)

За помощь в облучении образцов протонами выражаем благодарность коллективу предприятия НИЦ «Курчатовский институт – ИТЭФ» и лично В.С. Столбунову.

А.К. АБИШЕВА, А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ, А.К. АЙМУХАНОВ
Карагандинский университет им. Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ТРАНСПОРТНОГО СЛОЯ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК

Рассмотрены морфологические свойства ZnO, синтезированного методом золь-гель, в зависимости от отжига в различных условиях окружающей среды. Изготовлены образцы солнечных элементов, затравочные слои которых были получены путем отжига при 450°C в различных условиях окружающей среды: в атмосфере, в азотной и в вакуумной среде. Поверхность и микроструктура тонких пленок ZnO были измерены с помощью атомно-силового микроскопа.

A.K. ABISHEVA, A.K. ZEINIDENOV, A.K. AIMUKHANOV
Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

EFFECT OF ANNEALING UNDER DIFFERENT AMBIENT CONDITIONS ON THE STRUCTURAL FEATURES OF THE ELECTRON TRANSPORT LAYER OF SOLAR CELLS

The morphological properties of ZnO synthesized by the sol-gel method are considered depending on annealing under different ambient conditions. Samples of solar cells were fabricated, the seed layers of which were obtained by annealing at 450°C under various environmental conditions: atmosphere, nitrogen, and vacuum. The surface and microstructure of ZnO thin films were measured using an atomic force microscope.

Электронно-транспортный слой между металлическим и активным слоями в полимерных солнечных элементах может решить проблему, связанную с длительным воздействием воздуха, которое может привести к окислению электрода и разложению активного слоя из-за кислорода и влаги [1]. Хорошим кандидатом для таких буферных слоев является широкозонный полупроводник оксид цинка, который представляет глубокий интерес для применения в различных оптоэлектронных приборах. Мы изучали зависящее от окружающей среды влияние морфологии пленок ZnO на фотоэлектрические характеристики устройства, и было исследовано и оптимизировано влияние отжига в газовых средах затравочного слоя ZnO для инвертированных солнечных ячеек.

Для проведения измерений были подготовлены три образца солнечных ячеек, затравочные слои которых были получены путем отжига при 450°C в различных условиях окружающей среды: в атмосфере, в азотной среде и в вакууме. Изучение морфологии поверхности и шероховатости пленок проводили на атомно-силовом микроскопе JSPM-5400 (JEOL Ltd, Япония) в режиме полуконтактного сканирования. Анализ параметров морфологии поверхности проводили с использованием программного пакета WinSpmII Data Processing (JEOL Ltd).

Морфология поверхности пленок оксида цинка, изготовленного в атмосфере, азоте и в вакууме показаны на рисунке 1а, б, в, соответственно.

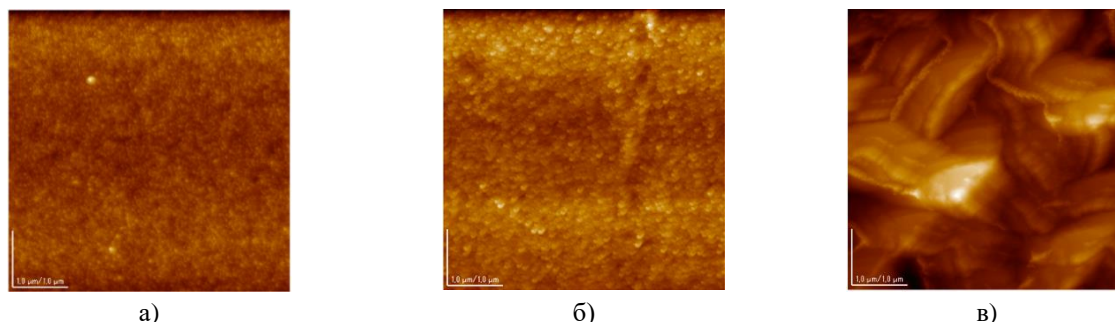


Рисунок 1. Снимки тонких пленок ZnO, отожженные: (а) атмосфере, (б) азоте, и (в) вакууме.

На снимках можно наблюдать поверхность с различной морфологией. Кристаллические зерна пленки ZnO, отожженной в вакууме, имеют гексагональную форму с четко выраженной границей, а размер зерна значительно больше, чем у образцов, отожженных в N₂ и O₂. Размер зерна тонких пленок ZnO, отожженных в вакууме, азоте и кислороде составляет в среднем 47 нм, 35 нм и 18 нм соответственно. Следовательно, отжиг в вакуумной среде вызывает как увеличение размера кристаллов, так и изменение формы зерен.

Это показывает, что отжиг в различных средах оказывает значительное влияние на структуру и морфологию поверхности тонких пленок ZnO.

Список литературы

1. S.K. Nau, H.L. Yip, N.S. Baek, J. Zou, K. O'Malley, A. K.Y. Jen. // Appl. Phys. Lett., 2008, Vol. 92, p. 253301.

ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ФРЕДГОЛЬМА ВТОРОГО РОДА ДЛЯ ОДНОЧАСТИЧНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Рассмотрена жидкость твердых сфер вблизи твердой поверхности. Локальная плотность жидкости описывается линейным интегральным уравнением Фредгольма второго рода для одночастичной функции распределения. Решение представлено в классе кусочно-непрерывных функций. Получено аналитическое решение на малых удалениях частиц жидкости от поверхности твердой поверхности.

YU.V. AGRAFONOV, I.S. PETRUSHIN, D.V. KHALAIMOV

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

FREDHOLM INTEGRAL EQUATION OF THE SECOND KIND FOR A SINGLE-PARTICLE DISTRIBUTION FUNCTION OF THE PHYSICS OF SURFACE PHENOMENA

The liquid of solid spheres near a solid surface is considered. The local density of the liquid is described by the Fredholm linear integral equation of the second kind for a single-particle distribution function. The solution is presented in the class of piecewise continuous functions. An analytical solution is obtained at small distances of liquid particles from the surface of a solid surface.

Для вычисления локальной микроструктуры граничных слоев жидкостей и термодинамических параметров необходимо знать одночастичную функцию распределения $G_1(\vec{r}_1) = \exp(-\Phi_1(\vec{r}_1)/kT + \omega_1(\vec{r}_1))$. Мы рассматриваем жидкость твердых сфер вблизи твердой поверхности. Одночастичный термический потенциал $\omega_1(\vec{r}_1)$ учитывает взаимодействие частицы с окружающей средой и на него накладывается граничное условие вдали от поверхности. Нами предложено [1-2] линейное интегральное уравнение для одночастичного потенциала

$$(e^{\omega_1(z_1)} - 1) - 2\pi n \int_0^{\infty} dz_2 (e^{\omega_1(z_2)} - 1) \int_{|z_{12}|}^{\infty} r_{12} dr_{12} C_{12}(r_{12}) = -2\pi n \int_{z_1}^{\infty} dz_{12} \int_{z_{12}}^{\infty} r_{12} dr_{12} C_{12}(r_{12}) \quad (1)$$

где z_1 - удаление частицы от поверхности. Данное уравнение есть линейное интегральное уравнение Фредгольма второго рода. Ядро уравнения и правая часть предварительно вычисляются из соответствующего интегрального уравнения для двухчастичной функции распределения макроскопической жидкости [3-6]. В частности, в приближении Перкуса-Йевики ядро и правая часть уравнения заданы на интервале $0 \leq z \leq 1$ и вычисляются аналитически. Тем самым уравнение (1) также может быть решено аналитически. Особенностью уравнения (1) является то, что для вычисления функции на интервале $0 \leq z_1 \leq 1$ необходимо знать, как она изменяется на интервале $1 \leq z_1 \leq 2$. В свою очередь, для этого необходимо знать изменение функции на интервале $2 \leq z_1 \leq 3$ и т.д. Таким образом, получается бесконечная последовательность функций $f_n(z_1)$, $n \leq z_1 \leq n+1$. Из условия непрерывности функций $f_0(z_1)$, $f_1(z_1)$ и их первых производных в точке $z_1 = 1$ нами получено решение на интервалах $0 \leq z_1 \leq 3$.

Данный алгоритм позволяет последовательно вычислять функцию $f_n(z_1)$ на всех следующих интервалах.

Список литературы

1. Yu.V. Agrafonov, I.S. Petrushin // Random First Order Transition from a Supercooled Liquid to an Ideal Glass // Condensed Matter and Interphases, 2020, 22(2), 291–302. DOI: [10.17308/kcmf.2020.22/2959](https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2959)
2. Y.V. Agrafonov, I.S. Petrushin // Using Molecular Distribution Functions to Calculate the Structural Properties of Amorphous Solids // Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics, 2020, 84, 783–787. DOI: [10.3103/S1062873820070035](https://doi.org/10.3103/S1062873820070035)
3. G.A. Martinov // Fundamental theory of liquids; method of distribution functions // Bristol; Philadelphia: Adam Hilger, 1992, 470p.
4. A.G. Vompe, G.A. Martynov // The self-consistent statistical theory of condensation // The Journal of chemical physics, 1997, 106(14), pp. 6095–6101. DOI: [10.1063/1.473272](https://doi.org/10.1063/1.473272)
5. F.J. Rogers, D.A. Young // New, thermodynamically consistent, integral equation for simple fluids // Physical Review A, 1984, 30(2), 999. DOI: [10.1103/PhysRevA.30.999](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.30.999)
6. D.A. Tikhonov, O.E. Kiselyov, G.A. Martynov, G.N. Sarkisov // Singlet integral equation in the statistical theory of surface phenomena in liquids // Journal of Molecular Liquids, 1999, vol. 82, pp. 3–17. DOI: [10.1016/S0167-7322\(99\)00037-9](https://doi.org/10.1016/S0167-7322(99)00037-9)

М.С. АНТИПОВ, А.Д. БАЖИНА, А.С. КОНСТАНТИНОВ, П.М. БАЖИН

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова, Черноголовка, Россия

СВС-ЭКСТРУЗИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С КОМПЛЕКСНОЙ СВЯЗКОЙ НИХРОМ, ИХ СВОЙСТВА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Методом СВС-экструзии были получены металлокерамические стержни на основе тугоплавких порошковых соединений. Изучались физико-механические свойства, а также фазовый и структурный состав. Было показано практическое применение полученных стержней, для нанесения защитных покрытий на металлорежущий инструмент.

M.S. ANTIPOV, A.D. BAZHINA, A.S. KONSTANTINOV, P.M. BAZHIN

Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science RAS A.G. Merzhanova, Chernogolovka, Russia

SHS-EXTRUSION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON TITANIUM CARBIDE WITH A COMPLEX BINDER OF NICHROME, THEIR PROPERTIES AND PRACTICAL APPLICATION

Metal-ceramic rods based on refractory powder compounds were obtained by SHS-extrusion. The physical and mechanical properties, as well as the binding and structural composition, were studied. The practical use of rods for detecting protection on metal-cutting tools was shown.

Твердые сплавы и композиционные материалы нашли свое широкое применение в машиностроении и инструментальной промышленности. Получаемые изделия из твердых порошковых реагентов обладают повышенной твердостью, прочностью и т.д. Так, например, в машиностроении твердые сплавы нашли свое применение в изготовлении деталей и узлов, работающих в экстремальных условиях, где происходит интенсивный износ. В инструментальной промышленности твердые сплавы нашли свое применение в изготовлении металлорежущего инструмента, сверл, фрез, метчиков и т.д.

На сегодняшний день актуальным направлением в получении твердосплавных и композиционных материалов является использование процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1] в сочетании с высокотемпературным сдвиговым деформированием в условиях СВС-экструзии [2]. Наиболее актуальными объектами для СВС-экструзии являются синтетические твердые инструментальные материалы (СТИМ), содержащие износостойкую составляющую (бориды, карбиды) и связующий металл (кобальт, никель, железо). Пластичность такого рода СВС-материалов после горения обуславливается наличием металлической связки, которая при достаточно высоких температурах играет роль смазки, облегчающей скольжение частиц твердой основы при экструзии. При этом металлическая матрица не вступает в химическое взаимодействие с исходным или промежуточными продуктами горения твердой основы, являясь своего рода инертным «пластификатором».

В настоящей работе методом СВС-экструзии были получены длинномерные стержни из материалов на основе карбида титана со связкой нихром, которая обеспечивает пластичность материала при деформировании, а также при синтезе взаимодействует с исходными компонентами с образованием новых упрочняющих фаз. Изучены особенности фазового состава, строения и физико-механических характеристик полученных материалов. Установлено, что полученные материалы обладают повышенными значениями твердости и прочности по сравнению с аналогичными твердыми безвольфрамовыми сплавами.

Полученные длинномерные стержни были применены в качестве СВС-электродов для нанесения защитных покрытий на металлорежущий инструмент: сверла диаметром 6, 8 и 10 мм методом электроискрового легирования (ЭИЛ). За счет повышенных физико-механических свойств полученных электродов и особенностей метода ЭИЛ был увеличен ресурс работы сверл до 10 раз по сравнению со стандартными покрытиями.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук № МД-2909.2021.4.

Список литературы

1. A.P. Chizhikov, A.S. Konstantinov, P.M. Bazhin // Russ. J. Inorg. Chem., 2021, Vol. 66., № 8, p. 1115. DOI:10.1134/S0036023621080039
2. M.S. Antipov, A.P. Chizhikov, A.S. Konstantinov, P.M. Bazhin // Refract. Ind. Ceram., 2021, Vol. 62, № 2, p. 208. DOI:10.1007/s11148-021-00584-7

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ TaC-Fe-Cr-Mo-Ni В МОРСКОЙ ВОДЕ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ФИНИШНОГО DLC СЛОЯ

Рассмотрены способ повышения износо- и коррозионной стойкости покрытий TaC-Cr-Mo-Ni, нанесенных на умеренно коррозионностойкую сталь 30X13, за счёт формирования финишного DLC, обладающего повышенной гидрофобностью. Оцениваются трибокоррозионные, электрохимические и механические свойства базовых и функционально-градиентных покрытий в искусственной морской воде.

M.N. ANTONYUK, K.A. KUPTSOV, A.N. SHEVEYKO, D.V. SHTANSKY
National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia

INCREASING THE WEAR AND CORROSION RESISTANCE OF ELECTROSPARK TaC-Fe-Cr-Mo-Ni COATINGS IN SEA WATER BY DEPOSITION OF A FINISHING DLC LAYER

A method for increasing the wear and corrosion resistance of TaC-Cr-Mo-Ni coatings deposited on moderately corrosion-resistant steel 30X13 by forming a finishing DLC with increased hydrophobicity is considered. The tribocorrosive, electrochemical and mechanical properties of base and functionally graded coatings in artificial sea water are evaluated.

Развитие морской техники приводит к увеличению спроса на детали трения с высокими эксплуатационными характеристиками, такими как высокая износо- и коррозионная стойкость, твердость и т.д., поскольку такие детали подвержены агрессивному воздействию морской воды, обладающей высокой коррозионной активностью [1].

Помимо этого, зачастую детали пар трения подвержены синергетическому воздействию, как электрохимической коррозии, так и механического износа. В результате чего металлические изделия преждевременно выходят из строя, так как при трении происходит разрушение пассивной пленки, которая ускоряет коррозию, а образующиеся продукты коррозии ускоряют износ [2]. Такое явление называется трибокоррозией. Одним из эффективных методов защиты поверхности металлических изделий от износа и коррозии является нанесение покрытий.

Методом электроискрового легирования (ЭИЛ) в вакууме с использованием электродов TaC-Cr-Mo-Ni были получены покрытия TaC-Fe-Cr-Mo-Ni на стальных подложках 30X13. Нанесение финишного DLC (diamond-like carbon) слоя на ЭИЛ покрытие осуществляли методом магнетронного распыления в газовой смеси этилена и аргона с использованием СВЧ мишени TiC-30%Mo. Перед осаждением покрытий в течение 15 минут проводилась ионная очистка подложек с ЭИЛ покрытием.

Структуру покрытий изучали методом сканирующей электронной микроскопии. Химический состав электродов и покрытий определяли методом энергодисперсионной спектроскопии. Фазовый состав покрытий определяли методом рентгенофазового анализа (РФА). Шероховатость поверхности покрытий и профили дорожек износа оценивались с помощью оптического профилометра. Трибокоррозионные испытания в искусственной морской воде проводили с использованием трибометра, оснащенного специальной трехэлектродной ячейкой, что позволяло регистрировать электрохимический потенциал с использованием потенциостата «Voltalab PST-050» в процессе трибологических испытаний. Испытания проводились по схеме «шарик-диск», приложенная нагрузка составляла 5 Н, дистанция пробега 500 м, линейная скорость в ходе испытания составила 10 см/с. В качестве контртела использовался шарик из Al_2O_3 диаметром 6 мм. Искусственная морская вода была приготовлена в соответствии со стандартом ASTM D1141-98.

Результаты структурных исследований показали, что ЭИЛ покрытие TaC-Fe-Cr-Mo-Ni и многослойное покрытие TaC-Fe-Cr-Mo-Ni/DLC обладали плотной, однородной, и бездефектной структурой, как в объеме покрытий, так и на границе между ЭИЛ и DLC слоями. Толщина ЭИЛ покрытия TaC-Fe-Cr-Mo-Ni составила 60 мкм, а DLC слоя 2 мкм. Структурные исследования методами РФА и СЭМ показали, что покрытия состоят из зерен TaC, расположенных в металлической матрице, состоящей из твердого раствора на основе Fe.

Нанесение покрытий позволило повысить коррозионную стойкость покрытий, как в стационарных условиях, так и в условиях трибологического контакта. Трибокоррозионные исследования в морской воде показали, что многослойное покрытие TaC-Fe-Cr-Mo-Ni/ DLC характеризовалось минимальным коэффициентом трения 0,1, что в 2,5-3 раза ниже, чем у ЭИЛ покрытия и подложки 30X13. Нанесение DLC слоя позволило повысить износостойкость ($0,1 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм) по сравнению с базовым ЭИЛ покрытием ($0,3 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм) и стальной подложкой ($0,7 \cdot 10^{-5}$ мм³/Нм). Нанесение DLC слоя позволило придать гидрофобные свойства поверхности ЭИЛ покрытия. Краевой угол смачивания TaC-Fe-Cr-Mo-Ni/ DLC был в полтора раза больше (101°), чем у базового покрытия (72°) и стальной подложки (63°).

Работа была выполнена в рамках проекта РФФИ № 20-08-01025.

Список литературы

1. J. Zou, Z. Wang, Y. Ma, Y. Yan, L. Qiao // Role of gradient nano-structured surface in collapsed pitting corrosion on AISI 316L stainless steel during tribocorrosion // *Corros. Sci.*, 2022, vol. 197, p. 110043. DOI: 10.1016/J.CORSCI.2021.110043
2. L. Cao, J. Liu, Y. Wan, and J. Pu // Corrosion and tribocorrosion behavior of W doped DLC coating in artificial seawater // *Diam. Relat. Mater.*, 2020, vol. 109, p. 108019. DOI: 10.1016/J.DIAMOND.2020.108019

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАГНИТНЫХ СОЛИТОНОВ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ

В последнее время нелинейные волны солитонного типа получили широкое распространение в различных областях физики [1,3]. Солитоны представляют собой структурно изолированные волны, распространяющиеся в нелинейной среде. Соли могут вести себя как частицы: когда они взаимодействуют друг с другом, им необходимо двигаться, сохраняя неизменной свою структуру и скорость. Один из наиболее известных представителей уравнения синус-Гордон, который может описывать поведение таких волн, был открыт для полупроизводных нелинейных дифференциальных уравнений. В физике магнитных явлений такое уравнение используется, например, для описания нелинейной динамики доменных границ в ферромагнетиках (ФМ) и слабых ферромагнетиках [1]. Однако создание теоретических моделей соответствующих экспериментов приводит к необходимости модификации, например, введением переменных коэффициентов параметров материала, внешних сил и падений [4].

В работе рассмотрена динамика магнитных солитонов в трех- и пятислойных ферромагнитных структурах. В рассматриваемых одномерных условиях уравнение движения для намагниченности сводится к УСГ с дополнительными членами, учитывающими магнитную анизотропию и пространственную модуляцию коллапса системы. Методами теории возбуждения солитонов найдены уравнения движения для координат центров магнитных солитонов. Рассмотрена вынужденная динамика доменных границ под действием внешнего магнитного поля и возможность возбуждения локализованных волн намагниченности. Исследовано влияние значений магнитных параметров слоев на структуру и динамические свойства магнитных солитонов.

Список литературы

- 1 М.А. Шамсутдинов, В.Н. Назаров, И. Ю. Ломакина // Ферро- и антиферромагнито-динамика. Нелинейные колебания, волны и солитоны, М.: Наука, 2009.
- 2 Л.В. Якушевич // Нелинейная физика ДНК // М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2007.
- 3 О.М. Браун, Ю.С. Кившарь // Модель Френкеля-Конторовой: Концепции, методы, приложения // М.: Физматлит, 2008
- 4 E. Ekomasov, R. Murtazin, O. Bogomazova, V. Nazarov // Materials Science Forum, 2016, pp. 195-198.

СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК CuO/C В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

Выявлен рост сенсорных свойств углеродной нанокompозитной пленки на основе оксида меди (CuO/C) при облучении её излучением в оптическом диапазоне. Нанокompозитные пленки получены методом электрофореза и исследованы с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС), атомно-силовой микроскопии (АСМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и спектрофотометрии. Разработана установка для измерения сенсорных свойств нанокompозитных пленок.

N.W. AUNG, MA.PUGACHEVSKII, A.P.KUZMENKO
¹Southwest State University, Kursk, Russia

VISIBLE SENSOR PROPERTIES OF THE NANOCOMPOSITE CuO/C FILMS

An increase in sensory properties of copper oxide based carbon (CuO/C) nanocomposite film when irradiated with radiation in the optical range. Nanocomposite films were obtained by electrophoresis and studied using Raman spectroscopy (RSS), atomic force microscopy (AFM), scanning electron microscopy (SEM), and spectrophotometry. A setup for measuring the sensory properties of nanocomposite films has been developed.

В настоящее время углеродные наноматериалы, включающие в свой состав переходные металлы, например, медь, титан и цинк представляют интерес благодаря своим четко определенным одномерным наноматериалам. Оксид меди является наиболее широко изученным материалом, используемым во многих различных областях. На основе оксида меди получается полупроводники, катализаторы и датчики. Электрофоретический метод позволяет получить углеродные нанопленки с покрытием из переходных металлов, что способствует увеличению спектра их применения [1].

Нанокompозитные пленки CuO/C изготовлены на стеклянной подложке с медными электродами с контролем параметров электрофоретического метода. Во-первых, исходные ОУНТ (ОУНТ TUBALLTM: 0,2%, Лигносульфат Vanisperse A: 1%, Вода: 98%) и дистиллированную воду (0,3 об./об. %) диспергировали в ультразвуковой ванне 30 минут. Далее раствор центрифугировали. Центрифугированный раствор углеродных наноматериалов наносили на стеклянную подложку с медными электродами, используя электростатическое поле для формирования нанокompозитных пленок. Наночастицы оксида меди, полученные из медных электродов, были покрыты углеродными наноматериалами за счет постоянного электрического тока [2,3]. После испарения воды нанокompозитные пленки CuO/C формировались на стеклянной подложке между медными электродами. Чувствительность фототока нанокompозитной пленки измеряли с помощью оптоэлектрического прибора (ADCL-CARDE2010D). Данный прибор используется для увеличения чувствительности АЦП к излучению видимого света во время процесса формирования пленок. Исследования оптоэлектрических свойств показывают, что с ростом интенсивности облучения I от 15 до 85 Вт/м^2 возбуждаемая электродвижущая сила (ЭДС) E в композитной нанопленке CuO/C возрастает от 0,5 до 2,2 мВ на рис. 1.

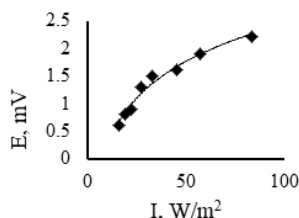


Рис. 1. Зависимость электродвижущей силы в нанокompозитных пленках CuO/C от интенсивности оптического облучения

В процессе электрофореза углеродные наноматериалы внедрялись в композитные пленки, ориентированные по направлению электрического поля от анода к катоду. При проведении оптоэлектрических измерений проводником для стока ЭДС, возникающей в пленке при облучении оптическими фотонами, мог служить углерод. В связи с этим уменьшилось количество межфазных границ, определяющих энергетические барьеры для протекания токов проводимости, что привело к значительному увеличению чувствительности композитных нанопленок CuO/C .

Список литературы

1. S. Giorgio // *Nanomaterials*, 2021, Vol.11, p. 967.
2. W.A. Nay, M.T. Myo, M.A. Pugachevskii, A.P. Kuzmenko, V.V. Rodionov // *Proceed. SWSU Uni. Seri.: Engine. and Tech.*, 2020, Vol.10, № 1, pp. 86-98.
3. W.A. Nay, M.A. Pugachevskii, A.P. Kuzmenko, M.T. Myo // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 2064, p. 012105.

АНИЗОТРОПИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ LiTaO₃

Методом Брэгговской дифракции света на звуке исследована анизотропия коэффициента акустооптического качества в кристаллах танталата лития в зависимости от направления волнового вектора света в плоскости, перпендикулярной направлению распространения акустической волны. Показано, что можно воздействовать на величину M_2 и управлять эффективностью Брэгговской дифракции света, изменяя направление волнового вектора падающего света.

F.R. AKHMEDZHANOV, U.SH. ABDIRAKHMONOV

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies AS RUz, Tashkent, Uzbekistan

ANISOTROPY OF ACOUSTOOPTICAL INTERACTION IN LiTaO₃ CRYSTALS

The anisotropy of the acousto optical quality factor in lithium tantalate crystals was studied by the method of Bragg diffraction of light by sound as a function of the direction of the light wave vector in the plane perpendicular to the direction of acoustic wave propagation. It is shown that it is possible to influence the value of M_2 and control the efficiency of the Bragg diffraction of light by changing the direction of the wave vector of the incident light.

Основной целью исследования является определение геометрии наиболее эффективного акустооптического взаимодействия акустических и оптических волн. Эксперименты проводились на образцах танталата лития, ориентированных вдоль кристаллографических осей [100] и [001] методом Диксона в режиме Брэгговской дифракции света на акустических волнах с частотами 400–1200 МГц, которые возбуждались кварцевыми преобразователями X- или Y-среза [1,2]. Источником света служил гелий-неоновый лазер ($\lambda_0=632,8\text{нм}$). Направление поляризации падающего на образец светового луча относительно волнового вектора и поляризации акустической волны определяли с помощью анализатора поляризации.

На основе измеренных интенсивностей дифрагированного света в образцах танталата лития для различных направлений и поляризаций света и акустической волны рассчитаны эффективные фотоупругие константы $p_{\text{эфф}}$ и коэффициент акустооптического качества M_2 . В частности, изучено влияние ориентации волнового вектора света в этих кристаллах на коэффициент акустооптического качества M_2 [2]:

$$M_2 = \frac{n_1^3 n_2^3 p_{\text{эфф}}^2}{\rho V^3} \quad (1)$$

где n_1 и n_2 - коэффициенты преломления падающего и дифрагированного света, соответственно, ρ - плотность, V - скорость акустической волны.

Эффективная фотоупругая постоянная, $p_{\text{эфф}}$ в соотношении (1) является сверткой фотоупругого тензора p_{ijkl} по векторам поляризации дифрагированного и падающего света α и β , и направления и поляризации звука k и γ [3]:

$$p_{\text{эфф}} = p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k k_l \quad (2)$$

Результаты исследования представлены на рисунке 1. Видно, что, изменяя направление волнового вектора падающего света относительно волнового вектора и поляризации акустической волны, можно воздействовать на величину M_2 и, в конечном итоге, управлять эффективностью Брэгговской дифракции света.

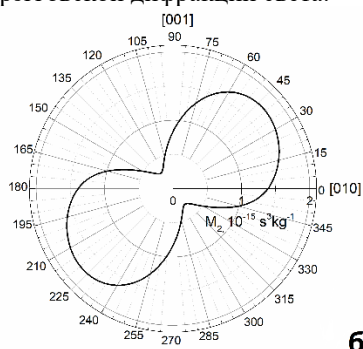


Рис. 1. Зависимость коэффициента акустооптического качества M_2 в кристаллах LiTaO₃ от направления волнового вектора света, в плоскости (100), при дифракции на продольных акустических волнах вдоль [100]

Список литературы

1. A. Erba, R. Dovesi // Photoelasticity of crystals from theoretical simulations // Phys. Rev, Vol. B88, 2013, pp. 045121.
2. R.W. Dixon, M.G. Cohen // A new technique for measuring magnitudes of Photoelastic Tensors and its Application to Lithium Niobate // Appl. Phys. Letter, Vol. 8, 1966, pp. 205-207.
3. F. R. Akhmedzhanov, U. Sh. Abdirakhmonov and V. N. Avdievich. Anisotropy of Acoustooptical Properties of Lithium Niobate. Crystals Sensors & Transducers, Vol. 254, Issue 7, 2021, pp. 43-46.

ФОТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ МОЛИБДАТА КАЛЬЦИЯ

Методом Диксона в режиме Брэгговской дифракции света на акустических волнах определена зависимость фотоупругих свойств кристаллов молибдата кальция, от направления поляризации дифрагированного света. Выявлены геометрии дифракции света, допускающие максимальное и минимальное значения акустооптической добротности.

F.R. AKHMEDZHANOV, M.I. ELBOYEVA

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies AS RUz, Tashkent, Uzbekistan

PHOTOELASTIC PROPERTIES OF CALCIUM MOLYBDATE CRYSTALS

The dependence of the photoelastic properties of calcium molybdate crystals on the direction of polarization of diffracted light was determined by the Dixon method in the Bragg diffraction of light on acoustic waves. Light diffraction geometries are revealed that allow the maximum and minimum values of the acousto-optic M₂-factor.

Монокристаллы молибдата кальция (CaMoO₄) [1] широко используются в акустооптических устройствах, эффективность которых зависит от коэффициента акустооптического качества при различных геометриях Брэгговской дифракции света на звуке. Эти зависимости исследованы нами при взаимодействии света с продольными и поперечными акустическими волнами, распространяющимися в кристаллах молибдата кальция в кристаллографической плоскости (001). В частности, определен коэффициент акустооптического качества M₂, который был введен Диксоном [2] в качестве характеристики эффективности Брэгговской дифракции на акустических волнах:

$$M_2 = \frac{n_1^3 n_2^3 p_{\text{эфф}}^2}{\rho V^3} \quad (1)$$

где n₁ и n₂ - коэффициенты преломления падающего и дифрагированного света, соответственно, ρ - плотность, V - скорость акустической волны.

Эффективная фотоупругая постоянная, p_{эфф} в соотношении (1) является сверткой значений компонент фотоупругого тензора p_{ijkl} рассматриваемого кристалла по нормированным векторам поляризации, соответственно, дифрагированного и падающего света α и β, и направления и поляризации акустической волны κ и γ:

$$p_{\text{эфф}} = p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k \kappa_l \quad (2)$$

Таким образом, изменяя направление поляризации падающего света относительно волнового вектора и поляризации акустической волны можно управлять эффективностью Брэгговской дифракции света [3]. На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента M₂ от направления волнового вектора света в плоскости (001).

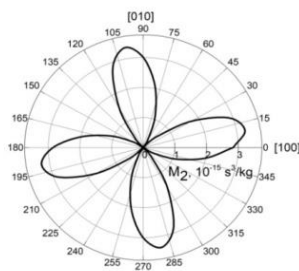


Рис. 1. Зависимость коэффициента акустооптического качества от направления поляризации света в плоскости (001), при дифракции света на продольных волнах вдоль [001] в кристаллах CaMoO₄.

Как видно из рисунка 1, изменяя направление поляризации падающего света, можно управлять величиной коэффициент акустооптического качества и, соответственно, эффективностью Брэгговской дифракции света.

Список литературы

1. N. Najafvandzadeh, S. Lopez-Moreno, D. Errandonea, P. Pavone, C. Draxl // First-principles study of elastic and thermal properties of scheelite-type molybdates and tungstates // Materials Today Communications, 2020, Vol. 24, pp. 101089.
2. R.W. Dixon // Acousto-optic interaction and devices // IEEE Trans, 1980, Vol. ED-17, №1, pp. 229-235.
3. С.Н.Антонов., А.В. Вайнер, В.В. Проклов, Ю.Г. Резвов // Брэгговская акустооптическая дифракция безперемодуляции при фазированном преобразователе // Журнал технической физики, 2010, том 80, вып. 9, стр. 104-109.

ФОРМИРОВАНИЕ МУЛЬТИФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКОЙ КОНДЕНСАЦИИ СВЕТА В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

Мультифотоны – нейтральные бозе-частицы–«хамелеоны», представляющие собой кванты обертоновых состояний электромагнитного поля, формирующиеся по каналам $\gamma + \gamma \rightarrow a_2$ (бифотоны), $\gamma + \gamma + \gamma \rightarrow a_3$ (трифотоны) и т.п. в сильных электромагнитных полях при выполнении условий синхронизма. В работе анализируется возможность генерации мультифотонных состояний на основе бозе-эйнштейновской конденсации света в резонансной оптической микрополости фотонного кристалла.

D.M. BEZVERKHNYAYA, V.V. FILATOV, D.R. YADRIKHINSKAYA
¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

FORMATION OF THE MULTIPHOTONIC STATES AT THE BOSE-EINSTEIN CONDENSATION OF A LIGHT INSIDE THE PHOTONIC CRYSTAL

Multiphotons, quanta of overtone states of the electromagnetic field, are neutral axion-like "chameleon" particles formed into the strong electromagnetic field when two, three or more photons combine inelastic way: $\gamma + \gamma \rightarrow a_2$ (biphotons), $\gamma + \gamma + \gamma \rightarrow a_3$ (triphotons) etc. The paper offers to produce multiphotons by using of the Bose-Einstein condensation of a light into the resonant optical microcavity of a photonic crystal.

Мультифотоны – легкие нейтральные частицы–«хамелеоны» с целочисленным спином, представляющие собой кванты обертоновых состояний электромагнитного поля, формирующиеся в сильных электромагнитных полях в результате неупругих процессов по следующим каналам: $\gamma + \gamma \rightarrow a_2$ (бифотоны, спин $s = 0$ или 2 в зависимости от направлений поляризации исходных фотонов), $\gamma + \gamma + \gamma \rightarrow a_3$ (трифотоны, $s = 1$ или 3) и т.п. Уравнения Клейна-Гордона-Фока для мультифотонов n -го «уровня» (a_n) имеют вид $\square\psi = -c_n E^n$ (без суммирования по n ; c_n – константы связи). Ввиду того, что условия синхронизма разрешают подобные неупругие процессы исключительно в вакууме, сечения взаимодействия фотонов чрезвычайно малы и формирование мультифотонов возможно только в сверхсильных электромагнитных полях. В данной работе анализируется возможность получения мультифотонов на основе бозе-эйнштейновской конденсации света в резонансной микрополости фотонного кристалла.

Как было показано в работе [1], в гармоническом приближении диэлектрическая функция $\varepsilon(\omega)$ одномерного фотонного кристалла (материала с периодической оптической сверхструктурой) представима в виде

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

где ε_∞ , ω_{lj} и ω_{0j} суть некоторые феноменологические постоянные. В этом случае оптический спектр кристалла представляется чередованием разрешенных и запрещенных фотонных зон, на краях которых ($\omega = \omega_{lj}$) локальное эффективное поле достигает резонансных значений $E_{eff} = E/\varepsilon = \infty$. Как показывают численные расчеты микроскопического поля [2,3], данный результат соответствует бозе-эйнштейновской конденсации поляритонов на частотах ω_{lj} в резонансных приповерхностных микрополостях фотонного кристалла. Поскольку все «сконденсированные» поляритоны описываются единой волновой функцией, а плотность фотонных состояний в бозе-конденсате стремится к бесконечности, то, несмотря на чрезвычайно малые сечения неупругого взаимодействия, мультифотоны становятся принципиально наблюдаемыми.

В раннем эксперименте по наблюдению эффекта «фотонного пламени» в глобулярном фотонном кристалле на основе искусственного опала [4] в спектрах излучения образца были зарегистрированы характерные пики многофотонных процессов, сопровождавшиеся примаковым прохождением света «сквозь стенку». Мы предлагаем интерпретировать данные результаты как наблюдение следов формирования в поляритонном бозе-конденсате мультифотонных состояний, их туннелирования через непрозрачные препятствия и последующего распада на регистрируемые фотоны. Наблюдавшийся оттенок свечения однозначно указывает на связь эффекта с бозе-конденсатом поляритонов на краю запрещенной фотонной зоны композита. Таким образом, фотонные кристаллы могут являться альтернативой коллайдерам в задаче получения аксионоподобных частиц [5].

Список литературы

1. S.V. Pichkurenko // Dispersion of light in the 1D photonic crystal // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2020, Vol. 859(1), p. 012003.
2. С.В. Пичкуненко, В.В. Филатов // Локализация и усиление электромагнитного поля в микрополостях глобулярного фотонного кристалла // Ядерная физика и инжиниринг, 2018, Том 9, № 6, стр. 582-584.
3. I.S. Alimkina et al. // Paraphoton generation by them mesoporous photonic crystals // Journal of Physics: Conference Series, 2020, Vol. 1557(1), p. 012008.
4. В.С. Гореликидр. // Спектральные характеристики излучения кристаллов искусственного опала при эффекте фотонного пламени // Письма в ЖЭТФ, 2006, Том 84, № 9, стр. 575-578.
5. V.V. Filatov et al. // Stimulated axion-like bipolariton generation in the globular photonic crystal // Mater. Sci. Forum, 2021, Vol. 1047, pp. 134-139.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ НА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА TiNiCu С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

В работе проведено исследование влияния скорости кристаллизации и содержания меди на термомеханические свойства быстро закаленного сплава TiNiCu с эффектом памяти формы. Аморфные ленты, изготовленные методом быстрой закалки из сплава TiNiCu с различным содержанием Cu 25–40 атомных % кристаллизовались током или в печи с различной скоростью. Продолжительность кристаллизации варьировалась в диапазоне $10 \div 30 \cdot 10^4$ мс. Проведен анализ термомеханических свойств полученных кристаллических лент.

K.A. BORODAKO, V.YU. NOVITSKY, T.YU. PRONCHENKO, A.V. SHELYAKOV

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE CRYSTALLIZATION RATE AND COPPER CONTENT ON THERMOMECHANICAL PROPERTIES OF TiNiCu SHAPE MEMORY ALLOY

Work deals with study of the influence of the crystallization rate and copper content on the thermomechanical properties of a rapidly quenched TiNiCu shape memory alloy/ Amorphous TiNiCu ribbons, made by rapid quenching from the melt with different Cu content 25–40 atomic %, were crystallized by current or in a furnace with different speeds. The duration of crystallization varied in the range of $10 \div 30 \cdot 10^4$ ms. The thermomechanical properties of the obtained crystalline ribbons were analyzed.

Сплавы с эффектом памяти формы уже имеют большую сферу применения и помогают автоматизировать некоторые процессы, благодаря своим свойствам [1,2]. Данные сплавы продолжают постоянно находить себе новые места для применения. Для решения современных технических задач нужны сплавы с определенными характеристиками, а именно: высокими величиной деформации, степенью восстановления исходной формы (ЭПФ) и механическим напряжением, генерируемым при нагреве, а также низким температурным интервалом проявления ЭПФ (форма гистерезиса превращения) [3]. Наиболее близкими свойствами обладают тонкомерные материалы из сплава TiNiCu с ЭПФ. Потому в качестве объекта исследования использовались тонкие ленты из сплава TiNiCu, полученные методом сверхбыстрой закалки из расплава, с различным содержанием меди 25 и 38 атомных процентов (ат.%) в аморфном состоянии шириной 1.91 мм, толщиной 50 мкм. Для придания лентам свойства ЭПФ были применены два способа кристаллизации: изотермическая кристаллизация в печи при температуре в 500 °С, в течение 300 секунд; кристаллизация током при помощи одиночного импульса постоянного тока длительностью 10 мс, плотность тока составляла: $I = 293$ А/мм² для сплава 38 ат. % меди, $I = 273$ А/мм² (25 ат. %)

Для исследования термомеханических характеристик использовалась специальная установка, в которой образцы растягивались с усилием 100 мПа на поперечное сечение ленты до деформации 1-3% [4]. Измерялась величина деформации при прохождении цикла охлаждение-нагрев. По полученным данным были построены графики зависимости деформации образцов (ϵ) от температуры (T , °С). По графикам были рассчитаны ширина температурного гистерезиса и величина ЭПФ, а также с помощью дополнительного построения были установлены характерные значения температур для начала M_s и конца M_f прямого и обратного (A_s/A_f) мартенситных фазовых превращений. Полученные значения приведены в таблице.

Таблица. Термомеханические свойства тонких лент из сплава TiNiCu

	Ti ₅₀ Ni ₁₂ Cu ₃₈	Ti ₅₀ Ni ₂₅ Cu ₂₅	Ti ₅₀ Ni ₂₅ Cu ₂₅
	ток	ток	печь
Величина ЭПФ (ϵ), %	1.32	2.80	2.70
Ширина Гистерезиса, °С	18	16	15
M_s/M_f , °С	54/73	60/76	56/73
A_s/A_f , °С	76/59	77/64	73/62

Показано, что для ленты с 38 ат. % содержанием меди кристаллизация в печи приводит к охрупчиванию сплава, поэтому данные для нее не были получены. Установлено, что увеличение содержания меди в сплаве негативно влияет на величину ЭПФ, а уменьшение времени кристаллизации улучшает термомеханические свойства сплавов. При увеличении содержания меди температурный гистерезис расширяется, а температуры фазовых превращений уменьшаются. Также показано, что в сплаве с 25 ат % Cu при изотермической кристаллизации в печи величина ЭПФ больше, гистерезис уже, температуры фазовых превращений ниже по сравнению с динамической.

Список литературы

1. S.H. Chang, S.K. Wu, H. Kimura // Mater. Sci. Eng. A, 2008, Vol. 76, № 1-2, p. 316.
2. G.P. Cheng, Z.L. Xie // J. Alloys Compd, 2005, Vol. 96, № 1-2, p. 128.
3. A.V. Shelyakov, N.N. Sitnikov, A.P. Menushenkov, A.A. Korneev, R.N. Rizakhanov, N.A. Sokolova // J. Alloys Compd, 2013, Vol. 577, № 1, p. S251.
4. A.H.Y. Lue, Y. Tomota, M. Taya, K. Inoue, T. Mori // Mater. Sci. Eng., 2000, Vol. A285, p. 326.

А.А. БУШ^{1,2}, В.И. КОЗЛОВ², В.Г. ТРОЦЕНКО¹, Е.С. ЖУКОВА¹, А.Ю. СЕРОВАЙСКИЙ³,
В.Г. КУЧЕРОВ³

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

²МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия

³Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

ОБРАЗЦЫ ФАЗЫ BiScO₃: ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ, ИНФРАКРАСНОЙ И РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Приводятся результаты получения образцов фазы BiScO₃ со структурой перовскита, определения температурной области ее стабильности при атмосферном давлении, изучения диэлектрических свойств, инфракрасных и рамановских спектров.

A.A. BUSH^{1,2}, V.I. KOZLOV², V.G. TROTSSENKO¹, E.S. ZHUKOVA¹, A.Y. SEROVAISKII³,
V.G. KUTCHEROV³

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

²MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia

³Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

BiScO₃ PEROVSKITE: PREPARATION AND CHARACTERIZATION BY DIELECTRIC, INFRARED AND RAMAN SPECTROSCOPIES

The results of obtaining samples of the BiScO₃ phase with a perovskite structure, determining the temperature range of its stability at atmospheric pressure, studying dielectric properties, infrared and Raman spectra are presented.

Феррит висмута BiFeO₃ является уникальным сегнетомагнетиком, сочетающим сегнетоэлектрические и ферромагнитные свойства. В отличие от других известных сегнетомагнетиков, сегнетоэлектрическая точка Кюри (T_C = 840°C), и ферромагнитная точка Нееля (T_N = 340°C) этой фазы лежат значительно выше комнатной температуры, что делает BiFeO₃ перспективным для применений в электронной технике [1,2]. Предполагается [1], что и другие члены семейства фаз BiMO₃ (M = Sc, Y, Cr, Mn, Fe, Co, Ni) со структурой перовскита также могут проявлять сегнетомагнитные свойства, аналогичные свойствам BiFeO₃. Среди этого ряда фаз только BiFeO₃ образуется при атмосферном давлении, в то время как другие члены семейства образуются только при высоких давлениях (6 - 10 ГПа) [1,3]. Из-за сложности синтеза соединений этих фаз их свойства остаются малоизученными. В настоящей работе мы описываем условия синтеза образцов фазы BiScO₃ со структурой перовскита в термобарических условиях, приводим результаты исследований их диэлектрических свойств, инфракрасных спектров и спектров комбинационного рассеяния. Однофазные образцы фазы BiScO₃ со структурой перовскита были получены при температурах T = 1000 - 1200°C и давлениях p = 6,0 - 7,5 ГПа с использованием установки высокого давления и высокой температуры УРС-2 (производство Технологического института сверхтвердых и новых углеродных материалов - ТИСНУМ, Троицк). Детальные исследования температурных (T = 10 - 350°C) и частотных (f = 25 Гц - 1 МГц) зависимостей диэлектрической проницаемости ε(T) и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ(T) не выявили каких-либо выраженных особенностей, характерных для фазовых переходов. Впервые изучены инфракрасные (частоты 30 - 15600 см⁻¹) и рамановские (частоты 90 - 2000 см⁻¹) спектры перовскитной фазы BiScO₃, получена количественная информация о параметрах инфракрасных и рамановских фононных резонансов (частотные положения, диэлектрические вклады и затухания). Обнаружено, что число (48) наблюдаемых инфракрасных мод значительно больше, чем число (27), предсказанное фактор-групповым анализом, выполненным для нецентросимметричной пространственной группы C₂, в то время как количество (до 26) наблюдаемых комбинационных резонансов соответствуют ситуации с 30 активными модами центросимметричной группы C₂/c. На основании детального анализа инфракрасных и рамановских спектров сделан вывод о том, что кристаллическая структура синтезированной фазы BiScO₃ является центросимметричной. Наблюдаемые в инфракрасных и рамановских спектрах дополнительные резонансы объясняются нарушением правил отбора из-за искажений кристаллической структуры и/или наличием сильных локальных искажений кристаллической структуры, вызванных неподеленной парой электронов Bi³⁺.

Исследования выполнены при поддержке Российского Научного Фонда (грант 21-12-00358, исследование диэлектрических свойств в диапазоне низких частот, измерения инфракрасных и рамановских спектров) и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 20-02-00915, часть работ по термобарическому синтезу образцов).

Список литературы

1. Yu.N. Venetsev, V.V. Gagulin, V.N. Lyubimov // *Seignetomagnetics*. Moscow: Nauka, 1982.
2. G. Catalan, J.F. Scott // *Advanced Materials*, 2009, Vol. 21, p. 2463.
3. A.A. Belik, S. Iikubo, K. Kodama et. al. // *J. Am. Chem. Soc.*, 2006, Vol. 122, p. 706.

ИЗНОСО- И ЖАРСТОЙКИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ В СИСТЕМЕ TA-ZR-SI-B-C-N

В работе были получены покрытия Ta-Zr-Si-B в среде рабочего газа Ar, а также смесях Ar + N₂ и Ar + C₂H₄. Исследованы структура, механические свойства, абразивная стойкость и жаростойкость покрытий Ta-Zr-Si-B-C-N. Покрытия, содержащие максимальную концентрацию азота и углерода, показали лучшие механические свойства и хорошую стойкость к окислению по сравнению с базовым покрытием, полученным в Ar.

R.A. VAKHRUSHEVA, D. SYTCHENKO, Ph.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV,
National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

WEAR AND OXIDATION-RESISTANT COATINGS IN Ta-Zr-Si-B-C-N SYSTEM

In the work, Ta-Zr-Si-B coatings were obtained in the Ar working gas medium, as well as Ar + N₂ and Ar + C₂H₄ mixtures. The structure, mechanical properties, abrasive resistance, and oxidation resistance of Ta-Zr-Si-B-C-N coatings have been studied. The coatings containing the maximum concentration of nitrogen and carbon showed better mechanical properties and good oxidation resistance compared to the base coating obtained in Ar.

В настоящее время покрытия на основе Ta-Si нашли широкое применение благодаря низкому коэффициенту теплового расширения ($8,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), высокой прочности при температурах выше 1000°C, стойкости к окислению до 1000°C [1]. Функциональные свойства покрытий на основе TaSi₂ могут быть повышены путем введения легирующих элементов. Добавление Zr и B приводит к росту твердости с 14 ГПа до 18 ГПа [2]. Покрытия Ta-Si легированные C и N обладают хорошими диффузионно-барьерными свойствами, высокой термической стабильностью и стойкостью к окислению, а также трибологическими характеристиками при температуре до 800°C: коэффициент трения снижается при возрастании температуры с 0,38 (25°C) до 0,28 (600°C) и 0,23 (800°C) [2].

Целью данной работы являлось исследование структуры, механических свойств, абразивной стойкости и жаростойкости покрытий Ta-Zr-Si-B-C-N, полученных методом магнетронного распыления в режиме постоянного тока.

Покрытия были получены методом магнетронного распыления мишени Ta-Zr-Si-B (70,8% Ta, 18,6% Si, 7,4 % Zr, 2,9% B) в среде рабочего газа Ar, а также смесях Ar+N₂ и Ar+ C₂H₄. Расход газа контролировался системой газонапуска PPG-12 Элточприбор. В качестве модельных подложек использовались пластины из Al₂O₃ и диски из Ti-сплава. Мощность на магнетроне поддерживалась на уровне 1 кВт с помощью источника питания Pinnacle+ Advanced Energy. Время осаждения составляло 40 минут. Для изучения структуры, элементного и фазового составов использовались методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа (РФА). Профили распределения элементов по глубине были получены методом оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда. Механические характеристики были измерены с помощью прибора Nano Hardness Tester при нагрузке 4 мН. Толщина и стойкость покрытий к абразивному воздействию оценивалась с помощью Calowear-тестера. Абразивная стойкость образцов оценивалась по объёму износа каждого образца. Изотермические отжиги покрытий проводились на воздухе в муфельной печи SNOL 3.3.2/1200 при 1000°C с выдержкой в течение 60 мин. Стойкость покрытий к окислению оценивалась по изменению массы после отжига.

Результаты СЭМ показали, что покрытия характеризовались плотной однородной структурой. Толщина покрытия, осаждённого в Ar, составила 7.3 мкм. Введение азота в рабочую среду приводило к росту толщины на ~10%, в то время как толщина углеродсодержащих покрытий снизилась на ~4-14% по сравнению с базовым образцом. В результате воздействия абразивных частиц на поверхности всех образцов наблюдались царапины, образовавшиеся в результате трения алмазных частиц. Объём зоны износа (V) для покрытия, осаждённого в Ar, составил 33 мм³. При введении 5%N₂ в рабочую среду, V снизился до 21 мм³. Увеличение концентрации N₂ до 10% характеризуется значением V=34мм³, близким к V базового неореакционного образца. Лучшую абразивную стойкость показали образцы, полученные в среде Ar+5-10%С₂H₄ и, характеризующиеся минимальными объёмами зон износа 19 и 18 мм³ соответственно. Результаты отжигов показали, что все исследованные покрытия выдерживали окисление на воздухе при 1000°C за счет образования защитных оксидных пленок Ta-Si-O. Напыление при оптимальных концентрациях азота и углерода модифицировало структуру и повышало жаростойкость.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект 0718–2020–0034).

Список литературы

1. N. Tan, T.A.N. Guerfi, J.Y. Veuillen, J. Derrien // Applied Surface Science, 1990, Vol. 41, pp. 266-271.
2. Ph.V. Kiryukhantsev-Korneev, A.D. Sytchenko, S.A. Vorotilo et al. // Coating, 2020, Vol. 10, pp. 946-961.
3. A.V. Bondarev, S. Vorotilo, I.V. Shchetinin et al. // Surface & Coatings Technology, 2019, Vol. 359, pp. 342-353.

С.В. ВЕСЕЛОВА¹, Д.А. АБИН¹, С.В. ПОКРОВСКИЙ¹, М.С. НОВИКОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВТСП ЛЕНТ НА ТОКОНЕСУЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ СОЗДАНИИ CORC КАБЕЛЯ

Исследованы различные варианты намотки ВТСП лент на цилиндрический держатель с диаметрами 4 мм, 5 мм, 5,65 мм и 8 мм. Проведен сравнительный анализ данных, полученных методом измерения транспортного тока и сканирующей холловской магнетометрии. Получены и обоснованы результаты оптимальных комбинаций намотки с различным усилием и углом к поверхности держателя.

S.V. VESELOVA¹, D.A. ABIN¹, S.V. POKROVSKI¹, M.S. NOVIKOV²

¹National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

INFLUENCE OF MECHANICAL DEFORMATIONS OF HTS TAPES ON THE CURRENT-CARRYING CHARACTERISTICS IN THE CREATION OF A CORC CABLE

Various variants of winding HTS tapes on a cylindrical holder with diameters of 4 mm, 5 mm, 5.65 mm and 8 mm have been studied. A comparative analysis of the data obtained by measuring the transport current and scanning Hall magnetometry has been carried out. The results of optimal combinations of winding with different force and angle to the surface of the holder are obtained and substantiated.

В настоящее время важной технологической задачей является создание CORC (Conductor on Round Core Cable) кабеля на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент второго поколения, который может быть использован для различных импульсных и крупных магнитов – ускорительных, индуктивного накопителя и т.д. Одним из этапов производства такого кабеля является многослойная спиральная намотка лент шириной 4 мм на мельхиоровую трубку, используемую в качестве и формера, и канала охлаждения. В процессе намотки кабеля или магнита из него лента может быть подвержена механическим повреждениям и, как следствие, необратимой локальной деформации сверхпроводящего слоя, что приведет к снижению токонесущих характеристик кабеля. Для CORC кабеля можно выделить отдельно дефекты намотки (погрешность укладки лент вдоль трубки) и локальные дефекты отдельных лент (области с низким критическим током).

В данной работе исследовалась возможность обнаружения и локализации дефектов методами сканирующей Холловской магнетометрии и 4х контактным методом измерения вольтамперной характеристики (ВАХ). Все измерения проводились при температуре кипения жидкого азота. Сканирующая холловская магнетометрия производилась после предварительного намагничивания образца. Полученные данные позволили рассчитать область протекания продольной и поперечной компоненты тока в каждом отдельном случае.

Для анализа было выбрано несколько вариантов намотки. Параметры образцов представлены в таблице.

Таблица. Параметры образцов, выбранные для исследования

Угол намотки, градусы	Толщина подложки, мкм	Диаметр трубки, мм	Усилие намотки, Н
22	30	8	10
			15
			20
		5,65	10
			15
			20
	4	10	
		15	
		20	
40	8	10	
		15	
		20	
40	30	5	10
			15
			20

Показано, что оптимальными параметрами для намотки ВТСП ленты с толщиной подложки 30 мкм являются: натяжение 10 Н, диаметр трубки 5 мм и выше, угол намотки 22 градуса. В этом случае не возникает резистивная составляющая ВАХ при токах ниже критического, и не наблюдается значительной деградации критического тока. Лента с толщиной подложки 40 мкм хорошо подходит для намотки на трубку диаметром 8 мм и углом 22 градуса.

Д.М. ВОРОПАЕВ^{1,2}, А.В. ФРОЛОВ¹, А.П. ОРЛОВ^{1,3}, А.А. СИНЧЕНКО^{1,4}, П. МОНСО⁵

¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (НИУ), Москва, Россия

³Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

⁴МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Институт Нееля НЦНИ, Гренобль, Франция

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА РЕЛАКСАЦИИ ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ В ОСНОВНОЕ СОСТОЯНИЕ В СОЕДИНЕНИЯХ HoTe_3 И TbTe_3

В мостиковых структурах в соединениях HoTe_3 и TbTe_3 , ориентированных вдоль направления скольжения волны зарядовой плотности (ВЗП), исследована эволюция порогового поля инициации движения ВЗП при выдержке образцов при различных температурах ниже перехода Пайерлса, а также в зависимости от подаваемого тока через образец. Было произведено сравнение полученных зависимостей на обоих соединениях, помимо этого, была произведена сравнительная оценка времен релаксаций в зависимости от близости температур выдержки к температуре Пайерлса.

D.M. VOROPAEV^{1,2}, A.V. FROLOV¹, A.P. ORLOV^{1,3}, A.A. SINCHENKO^{1,4}, P. MONCEAU⁵

¹Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

²Moscow institute of physics and technology (National Research University), Moscow, Russia

³Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS, Moscow, Russia

⁴Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁵Neel Institute CNRS, Grenoble, France

COMPARATIVE DYNAMICS OF RELAXATION OF A CHARGE DENSITY WAVE TO THE GROUND STATE IN COMPOUNDS HoTe_3 AND TbTe_3

In the bridge structures in the HoTe_3 and TbTe_3 junctions oriented along the direction of sliding of the charge density wave (CDW), the evolution of the threshold field of initiation of the movement of the CDW was investigated when samples were held at various temperatures below the Peierls transition, as well as depending on the current supplied through the sample. The obtained dependences were compared on both compounds; in addition, a comparative assessment of relaxation times was made depending on the proximity of exposure temperatures to the Peierls temperature.

Исследование квазидвумерных соединений представляет большой интерес с точки зрения различных свойств и состояний, которые можно реализовать в данных системах. В частности, в ряде квазидвумерных соединений существует волна зарядовой плотности (ВЗП), а в соединениях трителлуридов редкоземельных элементов RTe_3 (R: La, Ce, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Ho) наблюдалось её скольжение [1,2]. Ранее на образцах TbTe_3 было обнаружено, что при выдержке образца при температуре T в течение некоторого времени при отсутствующем токе через образец, величина порогового поля E_t сильно возрастает [3,4]. Помимо этого, в работе [5] было получено, что при выдержке с протеканием тока через образец, пороговое поле E_t эволюционирует в зависимости от величины этого тока: если ток выдержки был больше тока, соответствующего пороговому полю, то последнее слабо эволюционировало, в обратном случае оно релаксировало к определенным значениям порогового поля, большим изначального. Также в работе [3] были оценены времена релаксации порогового поля в образцах TbTe_3 при различных температурах. В соединении HoTe_3 с температурой Пайерлса $T_p=285\text{K}$, ранее не изучались данные эффекты. Целью данной работы является сравнение изученных ранее процессов релаксации ВЗП в соединении TbTe_3 с аналогичными экспериментами в соединении HoTe_3 и определение зависимости времени релаксации от абсолютного и относительного (T_p-T) значений температуры выдержки.

В данной работе была произведена серия экспериментов с соединением HoTe_3 в диапазоне температур от 180K до 300K при значениях тока выдержки от 10мкА до 2.5мА, на основании которых и происходит сравнение с опубликованными ранее данными. В результате экспериментов было получено, что при экспозиции образца при температуре ниже перехода Пайерлса значение порогового поля сильно изменялось для данной температуры, что совпадает с данными работы [3]. Также обнаружено соответствие в экспериментах с выдержкой при различных токах, т.е. при больших токах стремление к минимальному значению порогового поля, и при малых значениях рост последнего. Также были оценены значения времен релаксации при разных температурах в соединении HoTe_3 и, на основе сравнения с соединением TbTe_3 , было выдвинуто предположение о преобладающем влиянии на процесс релаксации величины температуры выдержки относительно перехода Пайерлса.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-22-00331).

Список литературы:

1. P. Monceau // *Advances in Physics*, 2012, Vol. 61, №. 4, pp. 325-581.
2. A.A. Sinchenko, P. Lejay, P. Monceau // *Phys. Rev. B*, 2012, Vol. 85, №. 24, p. 241104.
3. A.V. Frolov et al. // *Physical Review B*, 2020, Том 101, №. 15, стр. 155144.
4. A.V. Frolov et al. // *JETP Letters*, 2019, Vol. 109, №. 3, p. 203-206.
5. A. V. Frolov et al. // *Applied Physics Letters*, 2021, Том 118, №. 25, стр. 253102.

С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ^{1,2}, Р.М. ЭМИРОВ¹, М.Х. ГАДЖИЕВ³,
П.М. САЙПУЛАЕВ¹, М.В. ИЛЬИЧЕВ³

¹Дageстанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

³Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ BiFeO_3 ДО И ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ АРГОНА

Изучено влияние воздействия плазменным потоком аргона на диэлектрические свойства наноструктурированной керамики BiFeO_3 (BFO). Воздействие осуществлялось плазмой, создаваемой плазматроном постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода. Установлено, значения ϵ' и $\text{tg}\delta$ до и после обработки монотонно уменьшаются с увеличением частоты. Показан рост значений параметров ϵ' и $\text{tg}\delta$ при режиме обработки плазмой аргона.

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV¹, N.M.-R. ALIKHANOV^{1,2}, R.M. EMIROV¹, M.KH. GADZHIEV³, P.M. SAIPULAEV¹, M.V. ILYICHEV³

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Institute of Physics of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

³Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DIELECTRIC PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED CERAMICS BASED ON BiFeO_3 BEFORE AND AFTER EXPOSURE TO A PLASMA FLOW

The effect of exposure to an argon plasma flow on the dielectric properties of nanostructured BiFeO_3 (BFO) ceramics has been studied. The impact was carried out by plasma created by a direct current plasma torch with an expanding channel of the output electrode. It has been established that the values of ϵ' and $\text{tg}\delta$ before and after treatment decrease monotonically with increasing frequency. An increase in the values of the parameters ϵ' and $\text{tg}\delta$ in the treatment mode with argon plasma is shown.

Для изготовления градиентных материалов, имеющих изменяющиеся свойства от поверхности к объему, часто используют [1] методы плазменной обработки поверхности материала, вызывающие широкий спектр химических изменений в контролируемых плазмообразующих средах. Такая плазменная среда обладает достаточной энергией для селективного преобразования поверхностного слоя, не изменяя характеристик в объеме материала.

В данной работе приведены результаты исследования диэлектрических свойств наноструктурированной керамики BiFeO_3 до и после воздействия плазменным потоком аргона. Нанопорошки синтезированы золь-гель методом, согласно рекомендациям [2]. Плазма создавалась плазматроном постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода. Воздействие осуществлялось при параметрах: на расстоянии ~ 15 мм; в течение $\sim 5-10$ с; значениях температуры и концентрации электронов в присоединенной плазме $\sim 4-5$ кК и $\sim 10^{16}$ см⁻³. Исследования комплексной диэлектрической проницаемости проводились в интервале частот 1 кГц – 10 МГц с использованием измерителя LCR-78110G. Следует отметить, что образцы демонстрируют диэлектрическую релаксацию (рис 1.).

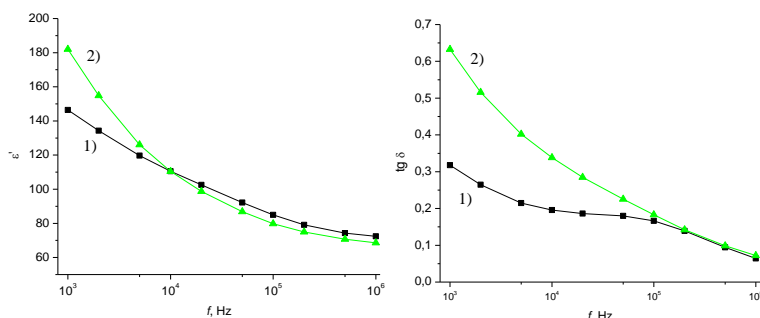


Рис. 1. Частотная зависимость ϵ' и $\text{tg}\delta$ до (1) и после (2) обработки в плазменном потоке.

Для образцов наблюдается дисперсия диэлектрических свойств в исследованном диапазоне частот. Как и предполагалось, значения диэлектрической проницаемости и потерь (ϵ' и $\text{tg}\delta$) монотонно уменьшаются с увеличением частоты. Как видно, наибольшая дисперсия проявлялась после обработки в среде аргона. Причем наблюдается рост значений обоих параметров при данном режиме обработки.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 20-08-00242А и частично ГЗ FZNZ-2020-0002.

Список литературы

1. S. Kh. Gadzhimagomedov et al. // Journal of Physics Conference Series, 2021, Vol. 1923(1), p. 012007.
2. A. E. Rabadanova et al. // Ferroelectrics, 2021, Vol. 576(1), pp. 1-7.

С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹, П.М. САЙПУЛАЕВ¹, Р.М. ЭМИРОВ¹,
Н.М.-Р. АЛИХАНОВ^{1,2}, А.Э. РАБАДАНОВА¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА РАЗМЕР КРИСТАЛЛИТОВ В НАНОПОРОШКЕ BaZrO₃

Синтезированы нанопорошки состава BaZrO₃ золь-гель методом и исследована их структура. Установлено в порошках максимальное (до ~ 90%) содержание фазы BaZrO₃ и соответственно минимальная доля вторичной фазы BaC₂. Осуществлена термообработка порошков при различных режимах. Исследовано влияние термообработки на средний размер кристаллитов. Установлено, снижение средних размеров кристаллитов при увеличении температуры обработки.

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV¹, P.M. SAIPULAEV¹, R.M. EMIROV¹,
N.M.-R. ALIKHANOV^{1,2}, A.E. RABADANOVA¹

¹DagestanStateUniversity, Makhachkala, Russia

²Institute of Physics of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON CRYSTALLITE SIZE IN BaZrO₃ NANOPOWDER

The BaZrO₃ nanopowders were synthesized by the sol-gel method and their structure was studied. The maximum (up to ~ 90%) content of the BaZrO₃ phase and, accordingly, the minimum fraction of the secondary BaC₂ phase were established in the powders. Heat treatment of powders was carried out under various modes. The influence of heat treatment on the average size of crystallites has been studied. It has been established that the average size of crystallites decreases with increasing processing temperature.

Материалы на основе BaZrO₃, обладающие высокой термической стабильностью и низкой теплопроводностью, до сих пор в центре внимания исследователей [1,2], и благодаря чему перспективны для использования термобарьерных покрытий в газовых турбинах и дизельных двигателях, в качестве высокотемпературных катализаторов и т.д. Для изготовления материалов на основе BaZrO₃ в наноструктурированном виде эффективно применяется золь-гель метод, включающий процесс смешивания прекурсоров на молекулярном уровне, позволяющий получать их с высокой однородностью по составу и контролируя стехиометрию. В настоящей работе синтезированы нанопорошки состава BaZrO₃, используя разновидность золь-гель метода. Полученный исходный порошок состоял из агломерированных наночастиц в виде «хлопьев» (см. рис. 1).

Для формирования заданной дисперсности частиц необходима термическая обработка. Такую обработку осуществляли при режимах (номер режима указан в скобках): при температурах 500°C (№1), 600°C (№2), 700°C (№3), 800°C (№4) и 900°C (№5) с выдержкой при них в течение 30 мин; для одного и того же порошка поэтапно в течение 30 мин в четыре режима (№6 -№9) – в один этап при 600°C (№6), в два этапа при 600°C и 700°C (№7), в три этапа при 600°C, 700°C и 800°C (№8), в четыре этапа при 600°C, 700°C, 800°C и 900°C (№ 9). Скорости подъема и охлаждения до этих температур составляли ~5°C/мин и ~3°C/мин.

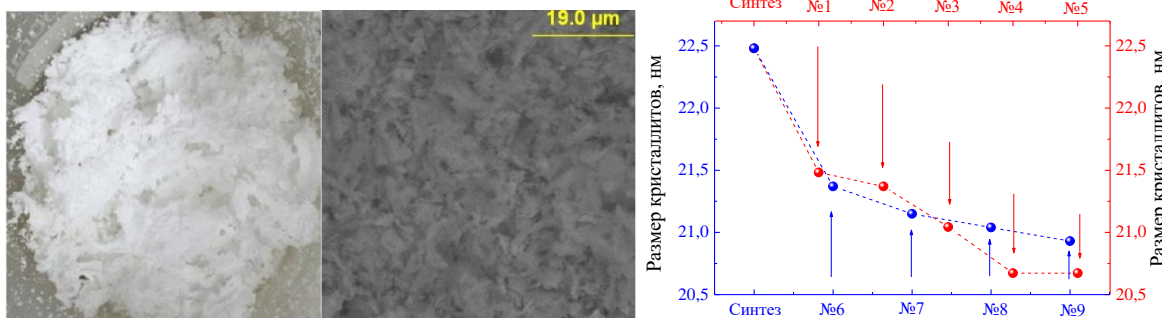


Рис. 1. Морфология исходного порошка и средний размер кристаллитов (до – исходного (синтезированного) и после термообработки при различных режимах обработки).

Согласно результатам структурного анализа, порошки преимущественно (около ~90%) обладают фазой BaZrO₃ с пространственной группой *Pm-3m* и побочной фазой карбида бария (фаза BaC₂). Средний размер кристаллитов, рассчитывался по полуширине пиков, используя известную формулу Шеррера. Как видно, наблюдается снижение средних размеров кристаллитов при увеличении температуры обработки (рис.1).

Работа выполнена в рамках проекта УМНИК (Договор 16504ГУ/2021 от 31.05.2021) и частично Государственного задания FZNZ-2020-0002.

Список литературы

1. Tsvetkov D. S. et al. // *Chimica Techno Acta.* – 2020. – Vol. 7. – № 2. – С. 42-50.
2. Алиханов Н.М. и др. // Патент № 2641203 от 16.01.2018.

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ЭКСТРУЗИЯ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ni-Al

Представлены результаты экспериментов по высокоскоростной экструзии реакционноспособной порошковой смеси Ni-Al. Высокоскоростная экструзия была осуществлена обжатием разгонной трубки скользящей детонационной волной. Рассмотрены структуры и свойства полученных материалов.

F.F. GALIEV, A.YU. MALAKHOV, I.V. DENISOV, S.A. SEROPYAN

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

HIGH-SPEED EXTRUSION OF Ni-Al POWDER MIXTURE

The results of experiments on high-speed extrusion of a reactive Ni-Al powder mixture are presented. High-speed extrusion was carried out by reduction the acceleration tube with an oblique shock wave. The structure and properties of the obtained materials are reconsidered.

В последние годы интерес многих исследователей вызывает ударно-волновая обработка порошковых смесей. Благодаря высоким давлениям, действующим на порошковую смесь, в ней происходят структурные изменения (измельчение зерен, активация границ контакта и т.п.) [1, 2]. Кроме того, перспективным методом получения материалов является ударно-волновая обработка реакционноспособных порошковых смесей [3]. Целью данной работы было определение возможности инициирования реакционноспособной порошковой смеси Ni-Al в цилиндрической ампуле и исследование структуры и свойств полученного продукта.

В работе представлены результаты двух экспериментов по высокоскоростной экструзии порошковой смеси Ni-Al при обжатии цилиндрических ампул скользящей детонационной волной. Ампулы состояли из обтекателя (Сталь 20), разгонной трубки (08X18H10T) и матрицы (Сталь 20). Схема ампулы представлена на рисунке 1а.

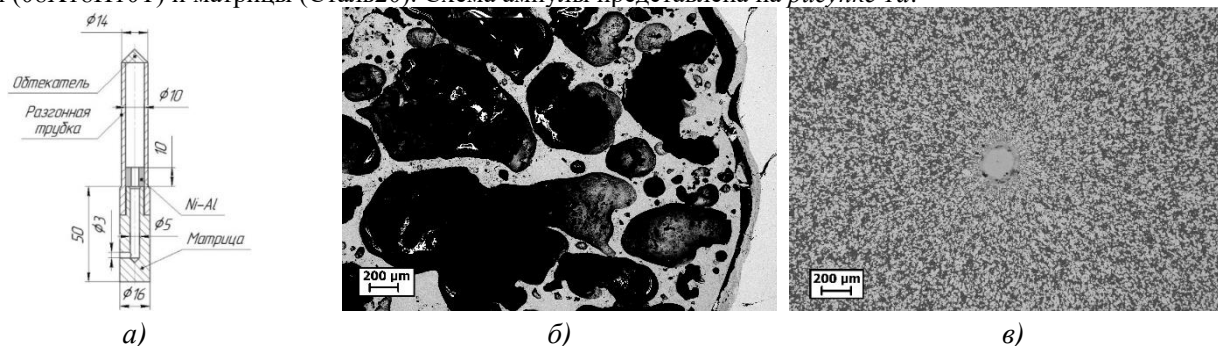


Рис. 1. Экспериментальная схема и структура материалов, а) схема ампулы, б) продукты реакции порошковой смеси и в) не прореагировавшая порошковая смесь

В качестве исходных материалов были использованы порошки никеля (ПНК УТ-3) и алюминия (АСД-1). Порошки перемешивались в эквимолярном соотношении, далее формировались цилиндрические таблетки диаметром и высотой 10 мм.

В результате воздействия продуктов детонации наружный диаметр разгонной трубки уменьшился с 14 мм до 9,5 мм, при скорости детонации 3150 м/с, и до 10,5 мм, при скорости детонации 3750 м/с. Экструзия порошковой смеси в обоих экспериментах была неполной, большая ее часть была обжата трубкой. В первом эксперименте верхняя половина порошковой смеси прореагировала с образованием фазы NiAl (рис. 1б). Нижняя половина уплотнилась (рис. 1в), в центре которой было обнаружено круглое структурное образование (рис. 1в), содержащее как элементы порошковой смеси, так и стальной разгонной трубки (Fe, Cr). Энергодисперсионный анализ показал наличие элементов разгонной трубки в верхней, прореагировавшей части порошковой смеси. Во втором эксперименте порошковая смесь прореагировала полностью с образованием фазы NiAl. Элементы разгонной трубки не были обнаружены. Была обнаружена частичная экструзия порошковой смеси с образованием фазы NiAl.

Установлено, что степень обжатия и полнота реакции зависят от режима нагружения. Обнаруженное в центре круглое структурное образование предположительно является остаточной частью от кумулятивной струи.

Список литературы

1. М.И. Алымов, Л.Б. Первухин, А.С. Рогачев, О.Л. Первухина, И.В. Сайков // ПОМ, 2014, Том 4, № 3, стр. 153.
2. K. Youngkook, M. Fumiaki, T. Ikegami, H. Kazuyuki, I. Shigeru // JEur. Ceram. Soc., 2011, Vol. 31, № 6, p. 1033.
3. S.A. Seropyan, I.V. Saikov, D.E. Andreev, G.R. Saikova, M.I. Alymov // Metals, 2021, Vol. 11, № 6, p. 949.

А.А. ГАРМАТИНА^{1,2}, А.В. ЛАЗАРЕВ³, Д.Н. ТРУБНИКОВ³, А.Г. ШУБНЫЙ², Н.В. МИНАЕВ²,
В.М. ГОРДИЕНКО^{2,3}

¹НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

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

ПОЛУЧЕНИЕ И ДИАГНОСТИКА МИКРОМИЦЕЛЛ С ПОЛЯРНЫМ ЯДРОМ D₂O В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ CO₂ РЕАКТОРЕ

Впервые синтезированы микромицеллы с полярным ядром из дейтерированной воды в сверхкритическом CO₂-реакторе и выявлены условия существования этой микроэмульсии. Микромицеллы могут быть использованы в качестве мишеней для генерации нейтронов при лазерном воздействии.

A.A.GARMATINA^{1,2}, A.V. LAZAREV³, D. N. TRUBNIKOV³, A.G. SHUBNYI², N.V.MINAEV²,
V.M.GORDIENKO^{2,3}

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia

³Moscow State University M.V. Lomonosov, Moscow, Russia

MAKING AND DIAGNOSIS OF MICROMICELLS WITH POLAR D₂O CORE IN SUPERCRITICAL CO₂ REACTOR

For the first time, supercritical micromicelles with a polar core from deuterated water in CO₂ reactor was synthesized. The conditions for the existence of this microemulsion were revealed. Micromicelles can be used as targets for generating neutrons under laser interaction.

Разработка методики управляемого синтеза в сверхкритическом CO₂ обратных микромицелл заданных размеров и концентраций может служить основой формирования в импульсных сверхзвуковых струях мишеней для экспериментов с интенсивным фемтосекундным лазерным излучением. Это могут быть наноагрегаты (мишени), содержащие полярные компоненты как с обычным водородом (вода, спирты, ацетон), так и дейтерированные. Создание мишеней, содержащих тяжелую воду интересно с точки зрения получения нейтронов. При этом практический интерес представляют параметры струи (плотность, концентрация и размер наноагрегатов) на срезе сопла.

Таким образом, целью настоящей работы являлись: синтез сверхкритической CO₂-микроэмульсии с полярным ядром микромицелл из тяжелой (дейтерированной) воды, изучение условий существования данных микромицелл и оценка концентрации формируемых при расширении в сопле наноагрегатов на срезе сопла.

В результате проведенных экспериментов была впервые синтезирована сверхкритическая CO₂-микроэмульсия с полярным ядром микромицелл из дейтерированной воды и выявлены условия существования этой микроэмульсии: При температуре смеси порядка 308К, молярной доле ПАВ (ТМН-6) 0,00298 г/моль, и концентрации воды 0,0184 г/моль, микромицеллы стабильно фиксировались при давлении более 93 атмосфер (их исчезновение фиксировалось визуально по резкому помутнению среды). Условия возникновения микромицелл с ядром из тяжелой воды примерно соответствуют условиям для обычной воды, в силу малой разницы дипольных моментов молекул: 1.86 и 1.84 D, соответственно.

Поскольку концентрация микромицелл составляет малую долю от газа-носителя в струе (в нашем случае CO₂), можно считать, что параметры такой струи близки к параметрам струи чистого CO₂ или слабо возмущены. При этом при расчете течения струи сверхкритического CO₂ в сопле использовалось уравнение состояния реального газа (Редлиха-Квонга), допускающего ошибку менее 2% в области изменения экспериментальных температур и давлений. Так, для условий эксперимента с тяжелой водой при температуре T=308 К и давлении 100 атмосфер в камере звукового сопла диаметром 0.05 см на срезе сопла концентрация капель тяжелой воды будет равна $5.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а их диаметр - 4.36 нм. Объемный расход смеси за импульс составляет 0.065 см³. Существенно, что в проведенном эксперименте точка помутнения лежит в дельте Видома, где флуктуации плотности среды могут оказывать влияние на условия формирования и устойчивость микромицелл.

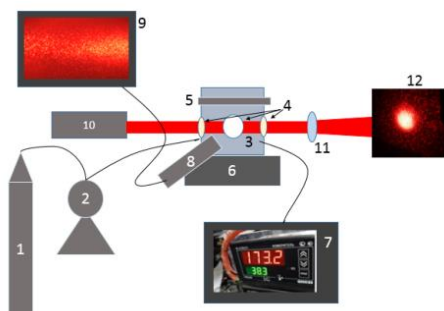


Рис.1 Схема эксперимента.
1 – баллон с CO₂, 2 – насос HPLC, закачивающий газ в камеру давлением,
3 – реактор, 4 – боковые смотровые окна,
5 – нагреватель, 6 – нагреватель, блок управления магнитной мешалкой, 7 – датчик температуры и давления, 8- фотокамера,
9 – экран, на который выводится изображение с фотокамеры, 10 – непрерывный He-Ne лазер, 11 – собирающая линза, 12 – экран, на который падает рассеянное средой излучение лазера.

К.С. ГРИШАКОВ^{1,2}, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт Проблем развития научно-образовательного потенциала молодежи, Москва, Россия

НОВЫЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ ТВЕРДЫЕ АТОМАРНЫЕ ФАЗЫ АЗОТА

В рамках теории функционала плотности изучена возможность формирования твердых атомарных фаз азота в результате адиабатического сжатия молекулярных и кластерных азотных структур при нулевой температуре. В результате моделирования удалось обнаружить три новые метастабильные фазы, динамически устойчивые в области низких давлений.

K.S. GRISHAKOV^{1,2}, N.N. DEGTYARENKO¹

¹National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

²Research Institute for the Development of Scientific and Educational Potential of Youth, Moscow, Russia

NEW METASTABLE SOLID ATOMIC PHASES OF NITROGEN

The possibility of the formation of solid atomic phases of nitrogen as a result of adiabatic compression of molecular and cluster nitrogen structures at zero temperature has been studied within the framework of the density functional theory. As a result of simulations, three new metastable phases were predicted. These phases are dynamically stable at low pressures.

В нормальных условиях атомы азота образуют двухатомные молекулы с прочной тройной ковалентной связью. Для азота энергия тройной связи оказывается больше, чем сумма трех энергий одинарной связи. Такое соотношение между энергиями связи не характерно для множества других элементов. Поэтому, создавая азотосодержащие вещества (например, азотные кластеры или твердые атомарные структуры), в которых атомы связаны одинарными связями, можно запастись большим количеством энергии. При нормальных условиях молекулярная фаза азота более термодинамически стабильна, чем азотные кластеры и кристаллические структуры. Поэтому немолекулярные структуры имеют тенденцию к распаду на двухатомные молекулы с выделением энергии. Т.к. молекулы N₂ являются основным компонентом атмосферного воздуха, то такие азотные структуры с одинарными связями между атомами рассматриваются в качестве экологически безопасных материалов с высокой плотностью запасаемой энергии. Несмотря на активные исследования экспериментальный синтез твердых атомарных азотных структур, устойчивых при условиях, близких к нормальным, является нерешенной задачей. Поэтому поиск новых твердых азотных фаз с одинарными связями между атомами, устойчивых в области низких давлений (<50 ГПа), а также определение основных свойств и особенностей, характерных для таких структур, является актуальной и важной задачей. В связи с тем, что для предсказания азотных структур уже ранее активно применялись современные эволюционные алгоритмы, позволившие открыть ряд твердых атомарных фаз азота [1], то дальнейший теоретический поиск новых структур, устойчивых в области низких давлений, с использованием таких алгоритмов оказывается существенно затруднен и требуется разработка новых подходов.

В данной работе для поиска новых твердых атомарных азотных фаз мы проводили моделирование процесса адиабатического сжатия при нулевой температуре различных молекулярных структур и кристаллов, образованных кластерами азота. Это позволило обнаружить три новые твердые фазы атомарного азота с симметриями кристаллической решетки P2₁, P1 и R3_c. Эти фазы являются метастабильными и динамически устойчивыми в области низких давлений. Проведено детальное исследование их электронных, фононных, и энергетических свойств, а также сопоставление этих характеристик с данными для других азотных кристаллов, известных в литературе. Твердая атомарная фаза азота с симметрией P2₁ оказалась динамически устойчивой вплоть до нулевого давления. Фаза P2₁ способна запастись энергией ~1.44 эВ/атом, что по крайней мере в несколько раз выше других высокоэнергетических веществ [2]. Предсказанные в работе твердые фазы P2₁ и R3_c по своим электронным свойствам при низких давлениях относятся к прямозонным полупроводникам. Стоит отметить, что все ранее рассматривавшиеся в литературе азотные кристаллические структуры являются полупроводниками или изоляторами, переход к металлическому состоянию происходит только при сверхвысоких давлениях > 400 ГПа. Предсказанная в данной работе кристаллическая фаза азота P1 является полуметаллом даже при давлениях меньше 100 ГПа. Поскольку все твердые атомарные фазы азота при низких давлениях являются метастабильными по отношению к молекулярной фазе, то более важную роль играют не энергетические соотношения между ними, а времена жизни этих метастабильных состояний и методики их получения. Множественность фаз азота, предсказываемых теоретически устойчивыми в области низких давлений (вплоть до нулевого давления), позволяет рассчитывать на возможность экспериментального синтеза таких структур в будущем. В дальнейшем необходимы более детальное теоретические исследования вопросов устойчивости данных твердых атомарных фаз азота к температурным возмущениям.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00017.

Список литературы

1. К. С. Гришаков, Н. Н. Дегтяренко // Письма в ЖЭТФ, 2020, Том 112, № 10, стр. 674.
2. V. E. Zarko // Combust Explos Shock Waves, 2010, Vol. 46, p. 121.

Д.С. ДАЙБАГЕ^{1,2}, А.В. ОСАДЧЕНКО^{1,2}, И.А. ЗАХАРЧУК^{1,2}, С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2},
А.С. СЕЛЮКОВ^{1,2,3}, Е.К. ЗАХАРОВА⁴, А.С. ПЕРЕПЕЛИЦА⁵, М.С. СМОРНОВ⁵, О.В. ОВЧИННИКОВ⁵

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

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

³Московский политехнический университет, Москва, Россия

⁴Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН), Москва, Россия

⁵Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag₂S ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Исследовано влияние внешнего электрического поля (0-500 кВ/см) на оптические свойства квантовых точек Ag₂S в органической матрице. Оно приводит к скачку интенсивности и увеличению скорости релаксации люминесценции, связанной с поверхностными состояниями, что связано с ускорением транспорта свободных дырок к центрам рекомбинации. Обнаружено, что при длительном воздействии лазерного излучения происходит деградация люминесцентных свойств нанокристаллов.

D.S. DAIBAGYA^{1,2}, A.V. OSADCHENKO^{1,2}, I.A. ZAKHARCHUK^{1,2}, S.A.A. MBROZEVICH^{1,2},
A.S. SELYUKOV^{1,2,3}, E.K. ZAKHAROVA⁴, A.S. PEREPELTSIA⁵, M.S. SMIRNOV⁵, O.V. OVCHINNIKOV⁵

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

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

³Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

⁴All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of Russian Academy of Sciences (VINITI RAS), Moscow, Russia

⁵Voronezh State University, Voronezh, Russia

LUMINESCENT PROPERTIES OF COLLOIDAL Ag₂S QUANTUM DOTS IN EXTERNAL ELECTRIC FIELD

The effect of an external electric field (0-500 kV/cm) on the optical properties of Ag₂S quantum dots in an organic matrix was studied. The field leads to a jump in the intensity and an increase in the relaxation rate of the trap-state luminescence, resulting from acceleration of the transport of free holes to recombination centers. It was found that under prolonged laser irradiation, degradation of the luminescent properties of the nanocrystals occurs.

Квантовые точки (КТ) используются в медицине, биологии, оптоэлектронике (в частности, для создания органико-неорганических светоизлучающих диодов) и других областях [1].

Во внешнем электрическом поле (ЭП, E) исследована фотолюминесценция (ФЛ) покрытых 2-меркаптопропионовой кислотой коллоидных КТ Ag₂S, синтезированных согласно методике, изложенной в [2].

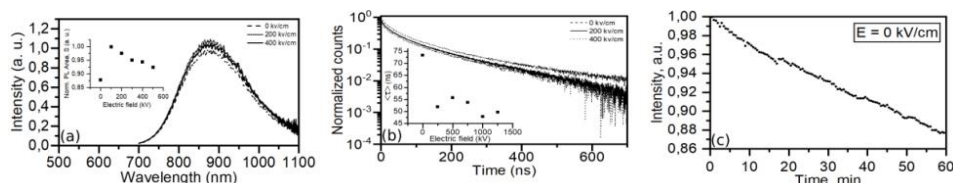


Рис. 1. Спектры ФЛ КТ Ag₂S при различных E и зависимость интегральной интенсивности ФЛ от E (а). Кривые затухания ФЛ КТ Ag₂S при различных значениях E и зависимость среднего времени затухания от E (б). Зависимость интегральной интенсивности ФЛ КТ Ag₂S от времени при непрерывном лазерном облучении в отсутствие внешнего электрического поля (с).

В спектрах ФЛ (Рис. 1а) КТ Ag₂S присутствует полоса с максимумом на 877 нм и полушириной ~190 нм. Наличие ЭП приводит к резкому скачку интенсивности ФЛ, связанному с ускорением транспорта свободных дырок к центрам рекомбинации [3]. Далее наблюдается снижение интенсивности ФЛ, обусловленное процессами деградации, предположительно возникающими из-за отрыва пассивирующих лигандов.

Кривые затухания ФЛ (Рис. 1б) аппроксимировались суммой четырех экспонент, и на их основании вычислялось среднее время жизни ФЛ. Ускорение затухания ФЛ при включении ЭП, как и увеличение ее интенсивности, объясняется ускорением образования и излучательной рекомбинации локализованных экситонов во внешнем ЭП.

В отсутствие ЭП, при длительном воздействии лазерного излучения (Рис. 1с) происходит снижение интегральной интенсивности ФЛ на 12%, что подтверждает наличие процессов деградации ФЛ КТ Ag₂S в данном случае.

Работа поддержана в рамках проекта РФФ №17-72-20088-п.

Список литературы

1. Sun Y., Jiang Y., Sun X.W., Zhang S., Chen S. // Chem. Rec. 2019. V. 19. P. 1729.
2. Bera D., Qian L., Tseng T. K., Holloway P. H. // Materials. 2010 V. 3. P. 2260.
3. Ovchinnikov O.V., Aslanov S.V., Smirnov M.S., et al. // RSC Adv. 2019. V. 9. P. 37312.

А.Ю. ДЕГТЯРЕНКО¹, В.А. ВЛАСЕНКО¹, А.В. ОВЧАРОВ², И.А. КАРАТЕЕВ², К.С. ПЕРВАКОВ¹

¹Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга ФИАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва Россия

МИКРОСТРУКТУРА МАГНИТНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА EU-1144

В данной работе были исследованы монокристаллы $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ВРПЭМ). Анализируя полученные изображения ВРПЭМ, была выявлена фаза EuFe_2As_2 (~ 5.6%). Включения являются несверхпроводящими. Мы предполагаем, что дефекты EuFe_2As_2 в соединении $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ могут действовать как 2D-центры пиннинга.

A.YU. DEGTYARENKO¹, V.A. VLASENKO¹, A.V. OVCHAROV², I.A. KARATEEV², K.S. PERVAKOV¹

¹V.L. Ginzburg Centre for High-Temperature Superconductivity and Quantum Materials LPI RAS, Moscow, Russia

²National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

MICROSTRUCTURE OF THE MAGNETIC SUPERCONDUCTOR Eu-1144

In this work single crystals of $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ were studied by high-resolution transmission electron microscopy (STEM). Based on HRTEM analysis the non-superconducting phase of EuFe_2As_2 (~ 5.6%) there was observed. The inclusions are not superconducting. We suppose that the EuFe_2As_2 defects in the $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ compound can act as a 2D pinning centers.

Открытые в 2016 году магнитные сверхпроводники системы 1144 ($\text{AeAFe}_4\text{As}_4$), в которых может сосуществовать одновременно два антагониста- сверхпроводимость и ферромагнетизм, представляют значительный интерес. Система 1144, как правило, включает в себя щелочной (или редкоземельный) и щелочноземельный металлы $\text{AeAFe}_4\text{As}_4$ ($\text{Ae} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Eu}$ и $\text{A} = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) [1]. Атомы щелочного металла A не смешиваются с атомами щелочноземельного Ae , ввиду большой разницы ионных радиусов Δr , таким образом, сверхпроводящая структура - AeA1144 кристаллизуется путем попеременной укладки слоев Ae и A поверх слоя Fe_2As_2 . Железосодержащий сверхпроводник $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ обладает рядом уникальных свойств, таких как сосуществование магнитного перехода, когда спины Eu^{2+} упорядочиваются при $T_m \approx 15$ К, и сверхпроводимости. Температура магнитного перехода ниже критической температуры сверхпроводящего перехода $T_c \approx 36$ К, а расчетное верхнее критическое магнитное поле B_{c2} составляет порядка ~100 Тл. [2].

Цель данной работы заключалась в исследовании монокристаллов $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ВРПЭМ). Образцы были синтезированы методом «self-flux» [3]. На основе анализа ВРПЭМ наблюдалось незначительное количество несверхпроводящей фазы EuFe_2As_2 (~5,6%), что согласуется с работой [4], где также были обнаружены включения слоев 122 в объеме CaK-1144 . Однако в соединении $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ включения не являются сверхпроводящими, поэтому не наблюдается второго пика намагниченности на кривой $M(H)$ при низких температурах, рис.1 (а) (в отличие от CaK-1144 в поле $H||ab$) на петлях магнитной необратимости. Сделан вывод, что дефекты несверхпроводящей фазы EuFe_2As_2 во внешнем магнитном поле $H||ab$ имеют двумерную структуру, рис.1 (б). Предполагается, что дефекты EuFe_2As_2 в соединении $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ могут действовать как двумерные центры пиннинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №21-12-00394) с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИАН.

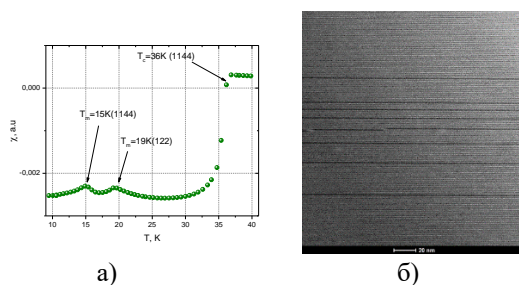


Рис. 1. Температурная зависимость магнитной восприимчивости монокристалла $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ – а), ВРПЭМ изображение монокристалла $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ с включениями EuFe_2As_2 (срез выполнен вдоль оси c) – б)

Список литературы

1. A. Iyo et al. // New - Structure - Type Fe-based superconductors: $\text{CaAFe}_4\text{As}_4$ ($\text{A} = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) and $\text{SrAFe}_4\text{As}_4$ ($\text{A} = \text{Rb}, \text{Cs}$). // J. Am. Chem. Soc, 2016, Vol. 138, № 10, pp. 3410-3415.
2. M. Bristow et al // Competing pairing interactions responsible for the large upper critical field in a stoichiometric iron-based superconductor $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ // Phys. Rev. B, 2020, Vol. 101, № 134502.
3. V. Vlasenko et al. // Vortex pinning and magnetic phase diagram of $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ iron-based superconductor // Supercond. Sci. Technol, 2020, Vol. 33, № 084009.
4. A. Ichinose et al. // Elucidating the origin of planar defects that enhance critical current density in $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ single crystals. // Supercond. Sci. Technol, 2021, Vol. 34, № 034003.

П.Н. ДЕГТЯРЕНКО^{1,2}, В.В. ЖЕЛТОВ¹, Н.Н. БАЛАШОВ¹, А.Ю. АРХАНГЕЛЬСКИЙ¹,
А.Ю. ДЕГТЯРЕНКО^{1,3}, К.Л. КОВАЛЕВ^{1,4}

¹Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук, Москва, Россия

²ООО «С-Инновации», Москва, Россия

³Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук, Москва, Россия

⁴Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЯХ ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВТСП ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Проведены численные расчеты потерь переменного тока в сверхпроводящих кабелях различной конструкции. Показано, что улучшение свойств ВТСП лент 2-го поколения приводит к снижению потерь при сохранении геометрии кабеля. Полученные результаты численного расчета будут использованы при проектировании кабелей с высокой токонесущей способностью различной конфигурации для нужд электроэнергетики.

P.N. DEGTYARENKO^{1,2}, V.V. ZHELTOV¹, N.N. BALASHOV¹, A. YU. ARCHANGELSKY¹,
A.YU. DEGTYARENKO^{1,3}, K.L. KOVALEV^{1,4}

¹JIHT RAS, Moscow, Russia

²S-Innovations, LLC, Moscow, Russia

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

⁴MAI (NRU), Moscow, Russia

AC LOSSES MINIMIZATION IN HTS CABLES CAUSED BY THE ENHANCEMENT OF 2G HTS TAPES CHARACTERISTICS

Numerical calculations of alternating current losses in superconducting cables of various designs have been carried out. It is shown that improving the properties of 2G HTS tapes leads to a decrease in losses while maintaining the cable geometry. The obtained results of the numerical calculation will be used in the design of cables with high current-carrying capacity of various configurations for the electric power industry.

За последнее время качество производимых высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент 2-го поколения значительно улучшилось. Примером этого является тот фактор, что токонесущая способность ВТСП лент 2-го поколения производства компании ООО «С-инновации» выросла в два раза больше по сравнению с образцами, полученными ранее. С другой стороны, улучшение однородности характеристик по длине позволило обеспечить их стабильную работу при меньшей толщине медного покрытия до 5 – 10 мкм. Все это позволяет не только разрабатывать ВТСП кабели с более высокой токонесущей способностью, но и снижать потери переменного тока в кабелях с критическими токами не более 5 кА. В частности, увеличение критического тока позволяет уменьшить количество слоев ВТСП лент без изменения габаритных размеров кабеля, а уменьшение толщины медного покрытия позволяет уменьшить расстояние между ВТСП-покрытиями в соседних слоях ВТСП лент без изменения их обычной конфигурации. В данной работе дан качественный анализ эффективности этих двух методов снижения потерь переменного тока. Расчеты выполнены для трехосных кабелей и кабелей с экранированными фазами с использованием методики численного моделирования.

П.Н. ДЕГТЯРЕНКО^{1,2}, В.В. ЖЕЛТОВ¹, Н.Н. БАЛАШОВ¹, А.Ю. АРХАНГЕЛЬСКИЙ¹,
А.Ю. ДЕГТЯРЕНКО^{1,3}, К.Л. КОВАЛЕВ^{1,4}

¹Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук, Москва, Россия

²ООО «С-Инновации», Москва, Россия

³Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук, Москва, Россия

⁴Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КЗ Короткого замыкания в ВТСП КАБЕЛЯХ С ВЫСОКОЙ ТОКОНЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ СОДЕРЖАЩИХ ВТСП-ПРЕДОХРАНИТЕЛЬ

Проведены численные расчеты эффективности ограничения токов КЗ с помощью ВТСП-Предохранителя в электрической сети, содержащей сверхпроводящую линию электропередач, включая расчеты для ВТСП кабелей различного типа. Представлены основные преимущества и недостатки ВТСП-предохранителя в сравнении с ограничителями тока короткого замыкания на основе ВТСП.

P.N. DEGTYARENKO^{1,2}, V.V. ZHELTOV¹, N.N. BALASHOV¹, A. YU. ARCHANGELSKY¹,
A. YU. DEGTYARENKO^{1,3}, K.L. KOVALEV^{1,4}

¹JHT RAS, Moscow, Russia

²S-Innovations, LLC, Moscow, Russia

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

⁴MAI (NRU), Moscow, Russia

There had been performed numerical calculations of the efficiency of the fault current limitation in an electric power network containing a HTS power transmission line. The calculations are made for various types of HTS cables. Basic advantages and disadvantages of HTS fuses as compared with other HTS fault current limiters are discussed.

THE EFFICACY CALCULATION OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN THE HTS CABLES CONTAINS OF HTS-FUSE

Активные работы в области производства высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент 2-го поколения позволили начать разработки по созданию различного рода электротехнического оборудования. В процессе его работы одной из важных проблем, которую предстоит решить – это снижение токов короткого замыкания (КЗ). Благодаря проведенным работам по совершенствованию ВТСП лент 2-го поколения, таких как увеличение критического тока лент до 800 А/12мм при температурах жидкого азота в собственном поле [1], удалось провести работу по созданию простого и дешевого устройства позволяющего ограничить токи КЗ и предотвратить выход из строя оборудования. Этим устройством является высокотемпературный сверхпроводящий предохранитель (ВТСП-П) [2]. Стоит отметить, что в случае защиты обычной электрической сети комплект ВТСП-П должен быть дополнен криогенной системой незначительной мощности. Однако, при наличии ВТСП-линии в таком дополнении нет необходимости, так как охлаждение ВТСП-П может быть осуществлено за счет криогенной системы самой ВТСП-линии. В представленной работе представлены численные расчеты эффективности ограничения токов КЗ с помощью ВТСП-П в электрической сети, содержащей сверхпроводящую линию электропередач. Расчеты проведены для кабелей различной конструкции [3]. Показано, что эффективность защиты сети, включая и защиту сверхпроводящего кабеля, не уступает эффективности использования известных токоограничителей.

Список литературы

1. В.В. Желтов и др. // Патент RU2064062021.
2. P. Degtyarenko et al // Sci. Rep., 2021, Vol. 47, № 11, p. 4714.
3. S. Kopylov et al // IEEE Trans. Appl. Supercond, 2019, Vol. 29(5), p. 2898511.

А.М. ДЕНЬГОВА¹, О.Л. ФЁДОРОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ООО «НПФ ПИТЭС», Ставрополь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССОВ СУХОГО ТРЕНИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассмотрено влияние на эффективную силу трения двух соприкасающихся пар трения из различных материалов акустического поля разной частоты колебаний и интенсивности I. Получены новые экспериментальные и аналитические зависимости эффективного коэффициента трения для разных пар трения при воздействии акустического поля различной частоты ν и интенсивности I от нормального коэффициента трения μ . Определены условия для снижения энергетических потерь в парах трения.

A.M. DENGOVA¹, O.L. FEDOROV²

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²LLC «SPC AITEN», Stavropol, Russia

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF DRY FRICTION PROCESSES ON THE EXPOSURE TO ACOUSTIC FIELD

The effect on the effective friction force of two contacting friction pairs made of different materials of an acoustic field of different oscillation frequencies and intensity I is considered. Experimental and analytical dependences of the effective friction coefficient for different friction pairs under the influence of an acoustic field of different frequency ν and intensity I on the normal friction coefficient μ are obtained. The conditions for reducing energy losses in friction pairs are determined.

Для измерения величины эффективной силы трения, возникающей между парами трения в акустическом поле, использовалась экспериментальная установка, состоящая из источника ультразвуковых колебаний (пьезоизлучателя) и прикрепленного к нему концентратора колебаний, на торцы которого помещались сменные пластины из различных материалов. Пластина с помещенным на неё грузом приводилась в движение, после чего производилось измерение возникающей эффективной силы трения. Результаты измерений представлены в таблице.

В настоящей работе найдены новые аналитические зависимости определяемого параметра - эффективного коэффициента трения $\mu_{\text{эф}}$ трущихся пар от определяющих параметров:

$$\mu_{\text{эф}} = \mu \left(1 - \sqrt{\frac{2I a V}{\rho c g}} \right), \quad (1)$$

где $\mu_{\text{эф}} = \frac{F_{\text{тр.эф}}}{N}$, $F_{\text{тр.эф}}$ - эффективная сила трения трогания при воздействии акустического поля, a - некоторый постоянный безразмерный коэффициент, ρ и c - плотность материала концентратора акустических колебаний и скорость распространения звука в нем соответственно, V - частота акустических колебаний, g - ускорение силы тяжести, I - интенсивность распространения волны. Экспериментальные зависимости эффективного коэффициента трения $\mu_{\text{эф}}$ от нормального коэффициента трения μ носят линейный характер и согласуются с аналитической зависимостью (1).

Таблица. Зависимость коэффициента трения от частоты акустических колебаний при постоянной интенсивности I

№, Номер пары трения, μ	$\nu=0$ кГц	$\nu=4$ кГц	$\nu=10$ кГц	$\nu=15$ кГц
1 Алюминиевый сплав мягкий - бронза	0,15	0,125	0,1125	0,094
2 Бронза	0,225	0,1868	0,167	0,15
3 Стеклотекстолит- Бронза	0,091	0,075	0,063	0,0573
4 Медь - Бронза	0,14	0,124	0,1025	0,0786
5 Алюминиевый сплав твёрдый - бронза	0,151	0,129	0,115	0,09
6 Оцинкованная сталь-бронза	0,155	0,345	0,113	0,091

В данной работе найдены новые экспериментальные и аналитические зависимости $\mu_{\text{эф}}=f(\mu)$, а также зависимости мощности трения от определяющих параметров. Определены условия энергетической выгоды при применении акустического воздействия на пару трения, а также границы применимости аналитических зависимостей.

Список литературы

1. А.М. Прохорова // Физическая энциклопедия под редакцией // М.: Советская энциклопедия, 1988, Том 1, стр. 346-347.
2. И.П. Галямина // Маленькая энциклопедия. Ультразвук // М.: Советская энциклопедия, 1979, стр. С. 9-21.
3. П.В. Новицкий //Электрические измерения неэлектрических величин // Спб: Энергия, 2005, стр. 35-65.
4. С.М. Тарг // Краткий курс теоретической механики // М.: Наука Главная редакция физико-математической литературы, 1987, стр.94-96.

А.И. ДМИТРИЕВ¹, А.В. КОЧУРА², А.П. КУЗЬМЕНКО², О.А. НОВОДВОРСКИЙ³, О.Д. ХРАМОВА³,
Л.С. ПАРШИНА³, А.Л. ВАСИЛЬЕВ⁴, Б.А. АРОНЗОН⁵

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

²Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

³Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура, Россия

⁴Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁵Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРМООБРАБОТКОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПЛЕНОК GaMnSb, ПОЛУЧЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

Исследованы условия и механизмы контролируемого изменения магнитокристаллической анизотропии пленок GaMnSb посредством термообработки. Установлено, что термообработка пленок приводит к заметному увеличению характеристик, определяющихся магнитной анизотропией: температуры блокировки и поля магнитной анизотропии.

A.I. DMITRIEV¹, A.V. KOCHURA², A.P. KUZMENKO², O.A. NOVODVORSKIY³, O.D. KHRAMOVA³,
L.S. PARSHINA³, A.L. VASILIEV⁴, B.A. ARONZON⁵

¹Institute for Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

³Institute of Problems of Laser and Information Technologies, Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Research Centre Crystallography and Photonics, Russian Academy of Sciences, Shatura, Russia

⁴National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

⁵Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

FORMATION BY HEAT TREATMENT OF MAGNETIC ANISOTROPY OF GaMnSb FILMS PRODUCED BY PULSED LASER DEPOSITION

The conditions and mechanisms of a controlled change in the magnetocrystalline anisotropy of GaMnSb films by heat treatment are studied. It has been established that the heat treatment of films leads to a noticeable increase in the characteristics determined by magnetic anisotropy: the blocking temperature and the magnetic anisotropy field.

Проведены исследования условий и механизмов контролируемого увеличения магнитной анизотропии посредством термообработки пленок GaMnSb, содержащих магнитные нановключения MnSb. Выполнены измерения температурных и полевых зависимостей магнитного момента двух групп образцов – не отожженных и подвергнутых отжигу. Температурные зависимости магнитного момента измерены в двух режимах – при охлаждении образца в нулевом магнитном поле и магнитном поле напряженностью 10 кЭ. Анализ полученных кривых позволил определить температуру блокировки нановключений MnSb пленок обеих групп. Полевые зависимости магнитного момента измерены в виде петель магнитного гистерезиса при различных температурах, что позволило построить температурную зависимость коэрцитивной силы нановключений MnSb пленок обеих групп. Показано, что температурная зависимость коэрцитивной силы описывается законом Кнеллера (Нееля-Брауна). Соответствующая аппроксимация позволила определить температуру блокировки и поле магнитной анизотропии нановключений MnSb пленок обеих групп.

Установлено, что термообработка пленок GaMnSb приводит к заметному увеличению характеристик, определяющихся магнитной анизотропией: температуры блокировки от 95К до 390К и поля магнитной анизотропии от 330Э до 630Э.

Данные просвечивающей электронной микроскопии указывают на то, что изменение магнитной анизотропии пленок GaMnSb в результате термообработки может быть обусловлено переходом кристаллической структуры магнитных нановключений MnSb из гексагональной (п.г. $R\bar{6}_3/mmc$) в кубическую (п.г. $F-43m$).

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А19-119092390079-8.

Список литературы

1. А.И. Дмитриев, А.В. Кочура, А.П. Кузьменко, Л.С. Паршина, О.А. Новодворский, О.Д. Храмова, Е.П. Кочура, А.Л. Васильев, Б.А. Аронзон // ЖЭТФ, 2018, Том 154, № 3(9), стр. 613.
2. А.И. Дмитриев, А.В. Кочура, А.П. Кузьменко, Л.С. Паршина, О.А. Новодворский, О.Д. Храмова, Е.П. Кочура, А.Л. Васильев, Б.А. Аронзон // ФТТ, 2019, Том 61, № 4, стр. 652.
3. А.И. Дмитриев, А.В. Кочура, А.П. Кузьменко, Л.С. Паршина, О.А. Новодворский, О.Д. Храмова, Е.П. Кочура, А.Л. Васильев, Е.И. Нехаева, Б.А. Аронзон // ФТТ, 2020, Том 62, № 2, стр. 203.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ ВОДОРОДА С ГРАФЕНОМ

В работе с использованием эмпирического потенциала межатомного взаимодействия AIREBO выведены формулы для потенциала и силы взаимодействия атомы водорода H с листом графена. Проведено компьютерное моделирование падения атома водорода на графен. Показано влияние различных температуры при падении атомов водорода на графене.

Kh.I. JABBOROV^{1,2}, I.D. YADGAROV²

¹Research Institute for the Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence, Tashkent, Uzbekistan

²Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE INTERACTION OF HYDROGEN ATOMS WITH GRAPHEN

Using the empirical potential of the interatomic interaction AIREBO, formulas for the potential and force of interaction of hydrogen atoms H with an ideal graphene sheet are derived. A computer simulation of the fall of a hydrogen atom on graphene was carried out. The effect on various temperatures of the incidence of hydrogen atoms on graphene is shown.

Моделирование молекулярной динамики с использованием потенциала AIREBO[1] выполняется с использованием пакета LAMMPS. Потенциал состоит из трех условий,

$$E = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} E_{ij}^{REBO} + E_{ij}^{LJ} + \sum_{k \neq i,j} \sum_{l \neq i,j,k} E_{ijkl}^{TORSION} \quad (1)$$

E_{ij}^{REBO} обозначает углеводородный потенциал REBO; включает в себя дальнедействующие взаимодействия, аналогичные стандартному потенциалу Леонарда–Джонса; $\sum_{k \neq i,j} \sum_{l \neq i,j,k} E_{ijkl}^{TORSION}$ является явным четырехчастичным потенциалом, который описывает различные предпочтения двугранного угла в углеводородных конфигурациях. Все три члена включены в наши расчеты. Моделирование проводилось с помощью свободно распространяемого пакета LAMMPS [2]. Графеновая структура размером $100 \times 100 \text{ \AA}$ состоит из 3936 атомов углерода, которые располагались в вершинах гексагональных плоских ячеек на расстоянии 1.4 А друг от друга. Периодические граничные условия прикладывались вдоль трех направлений. Причем, по осям x и y, периодическое повторение ячейки моделирования осуществлялось так, чтобы воспроизводился бесконечный лист графена. В направлении z ячейка периодичности была выбрана достаточно большой, так, чтобы позволить падение атома водорода с некоторой высоты.

Расстояние от поверхности графена до атома водорода равно $h = \{10, 20\} \text{ \AA}$. Подбирались энергии величиной от 0.1 эВ до 500 эВ с шагом 5эВ. Структура приводилась к заданной температуре 0, 300 или 600 К с применением микроканонического ансамбля NVE [3]. В процессе моделирования атомы H осаждались на графен в течении времени от 1 пс до 10 пс.

Для каждой комбинации мы выполняли несколько ударов при нормальном падении в случайных точках обновленной ячейки, каждая траектория отслеживалась в течение 1 пс. Затем мы статистически рассчитывали вероятность отскакивания, адсорбции и проникновения. Зависимость температуры атомов водорода, падающих по нормали на атом углерода, приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Влияние точки падения H и температуры поверхности графена на вероятности адсорбции, отскакивания и разрушения в структуре графена.

Температура, К	Промежуток энергии для процесса адсорбции, эВ	Промежуток энергии для процесса отскакивание, эВ	Промежуток энергии для процесса разрушение, эВ	Разность, %
0	1.5 ÷ 4.5	4.6 ÷ 56	56.2 ÷ 500	10.5
300	1.7 ÷ 4.1	1.8 ÷ 73	73.1 ÷ 500	8
600	1.8 ÷ 3.7	1.9 ÷ 77	2 ÷ 500	17

Результаты показали, что при падении атома водорода по нормали в центр гексогона адсорбция и разрушение не наблюдаются. При некоторых результатах наблюдается процесс разрушения и прохождения одновременно.

Список литературы

1. X. Yang, S. Wu, J. Xu, B. Cao, C. Albert//Physical E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2018, Vol. 96, pp. 46-53.
2. J. Jeffers, R. James, S. Avinash // Chapter 20 - Optimizing classical molecular dynamics in LAMMPS, 2016, pp.443-470.
3. E. Scalas, A.T. Gabriel, E. Martin, G. Germano// Physical Review, 2012, E 92(2).

А.А. ЗАРИПОВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ИСКРОВОХ РАЗРЯДОВ

Метод получения наночастиц металлов.

A.A. ZARIPOV

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

SYNTHESIS OF NANOPARTICLES USING SPARK DISCHARGE

Method for the synthesis of metal nanoparticles.

Области применения металлических наночастиц настолько разнообразны, что уже невозможно представить отрасли, в которых они не используются. Процесс синтеза наночастиц металлов осуществляется различными способами. Однако во всех методах синтеза существуют риски, связанные с агломерацией образующихся наночастиц. Процесс агломерации не позволяет наночастицам проявлять свойства, близкие к квантовым эффектам [1]. Поэтому для успешного предотвращения процесса агломерации мы использовали воздействие разрядов на металлы при синтезе наночастиц. Ведь этот метод выгодно отличается от других тем, что может использовать различные среды (жидкие, газообразные, вакуумные процессы) для синтеза наночастиц.

При получении металлических наночастиц мы использовали генератор импульсов на основе современных транзисторов, предназначенный для использования в различных средах. Генератор импульсов имеет возможность работать на такой частоте, с помощью которой можно управлять размером и дисперсией образующихся частиц. Однако, процесс агломерации, как мы уже упомянули предотвращается именно с помощью среды.

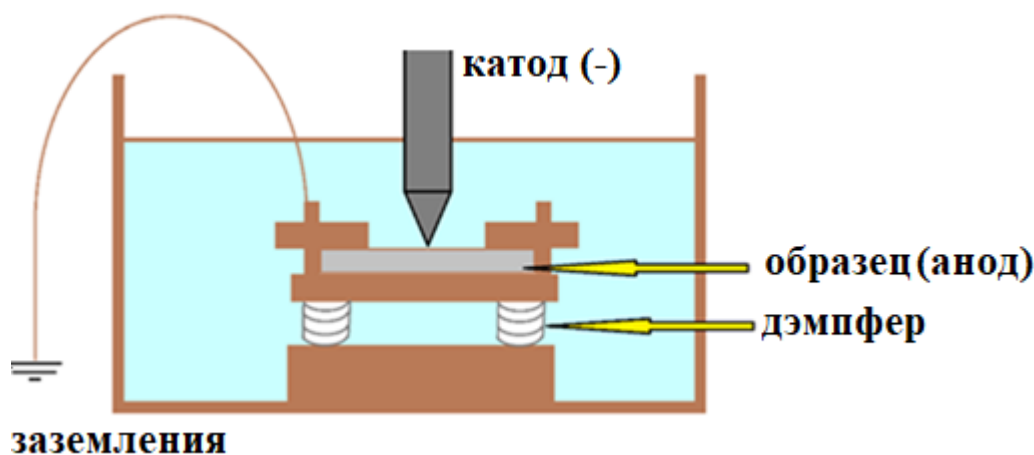


Рис.1. Схематическое изображение синтеза наночастиц в жидкостях

Механизм воздействия импульсных разрядов на металлы в жидких средах очень сложен. Помимо разрядов там участвуют кавитационные процессы, если среда электролитическая, то присутствует и химическая составляющая [2]. Хотя наночастицы примерно одинаковой формы и размера (от 25 нм и выше) можно получить в жидкостях, процесс агломерации неизбежен. Поэтому наночастицы железа и никеля (до 20 нм) были получены в среде инертного газа аргона. Как показывают предварительные результаты, удаление наночастиц из рабочей зоны с помощью аргона успешно предотвращает процесс агломерации в металлах железа и никеля.

Список литературы

1. Campos, A., Troc, N., Cottancin, E., Pellarin, M., Weissker, H. C., Lermé, J., ... & Hillenkamp, M. (2019). Plasmonic quantum size effects in silver nanoparticles are dominated by interfaces and local environments. *Nature Physics*, Vol. 15(3), pp. 275-280.
2. А.А. Зарипов, Х.Б. Ашуров // Вклады различных факторов в процесс электроимпульсной обработки диэлектриков // *Узбекский физический журнал*, 2016. Vol.18. №.3, pp. 214-218.

А.А. ЗАСЫПКИНА¹, М.В. СИНЯКОВ^{1,2}, Д.Д. СПАСОВ^{1,3}, Р.М. МЕНШАРАПОВ¹, Н.А. ИВАНОВА¹,
О.К. АЛЕКСЕЕВА¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

АНТИКОРРОЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ТИТАНА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ПОМОЩИ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Рассмотрено влияние титановых покрытий различного состава и структуры, на повышение времени работы обратимого топливного элемента и ингибирование процессов коррозии. Покрытия получены методом магнетронного распыления титановой мишени на поверхность электродов в различных режимах и условиях. Показано, что применение нитридов титана приводит к увеличению срока эксплуатации устройства, а также увеличивает его рабочие характеристики.

A.A. ZASYPKINA¹, M.V. SINYAKOV^{1,2}, D.D. SPASOV^{1,3}, R.M. MENSCHARAPOV¹, N.A. IVANOVA¹,
O.K. ALEKSEEVA¹

¹National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

²Russian University of Chemical Technology named after D.I. Mendeleev, Moscow, Russia

³National Research University MPEI, Moscow, Russia

CORROSION RESISTANT COATINGS BASED ON Ti-N OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING FOR ELECTROCHEMICAL DEVICES WITH A SOLID POLYMER ELECTROLYTE

The effect of various modes and conditions of magnetron sputtering on the structure and properties of titanium-based coatings. Using electrodes with coatings, especially based on titanium nitrides, as parts of a reversible fuel cell increase their performance and operation time and limit corrosion processes.

Метод магнетронного распыления (МР) – эффективная технология, которая не требует многостадийных процессов, обеспечивает контролируемое получение различных покрытий, в том числе и нитридных, необходимой толщины на материалах разной конфигурации и с разной морфологией поверхности [1, 2]. МР в отличие от других методов, позволяет осуществлять удаление слоя оксида титана непосредственно перед нанесением покрытия путем ионной очистки в той же камере при подаче импульсного отрицательного напряжения смещения на подложку [3].

В данной работе исследовалось влияние различных режимов магнетронного распыления титановых покрытий на рабочие характеристики газодиффузионных слоев (ГДС), представляющих собой электроды электрохимического устройства с твердым полимерным электролитом. В качестве ГДС использовалась углеродная ткань российского производства. Используемые режимы распыления указаны в таблице. При помощи рентгеноструктурного фазового анализа и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа был определен состав полученных покрытий представленных в работе образцов, что также отражено в таблице. Применение различных режимов и условий магнетронного распыления позволило получить ряд покрытий на основе титана разного состава (металлический титан, нитриды титана и оксинитриды титана) и структуры (от агломератов ярко выраженной кристаллической структуры до чешуйчатых пленок). Для определения рабочих характеристик обратимого топливного элемента был собран и испытан мембранно-электродный блок (МЭБ) как в составе электролизера, так и в режиме топливного элемента.

Таблица. Характеристики полученных покрытий

№	Режим и условия напыления	Цвет полученного покрытия	Элементный состав	Состав покрытия
I	Постоянный ток, газ Аргон	Серебристый	Преимущественно титан	Ti
II	Постоянный ток со смещением на подложке, газ Аргон + N ₂	Желто-оранжевый	Преимущественно нитрид титана	TiN _y (TiN _{0,176})
III	Постоянный ток со смещением на подложке, газ Аргон + N ₂	Сине-голубой	Оксинитриды титана	TiO _x N _y

Применение титанового покрытия позволило уменьшить сопротивление ячейки и увеличить рабочий ресурс МЭБ обратимого топливного элемента в целом в режиме электролизера, а также улучшить характеристики МЭБ в составе ячейки топливного элемента, что объясняется повышением электропроводности нанесенного защитного слоя и снижением омических потерь в ячейке топливного элемента в целом.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации МК-4120.2022.1.3.

Список литературы

1. Н.А. Иванова, А.А. Засыпкина, Е.В. Ястремский, Р.А. Камышинский, В.В. Тишкин, О.К. Алексеева // Сборник научных трудов VII международной конференции «ЛаПлаз», 2021, Часть 1, стр. 213-214.
2. S.Y.Fang, L.G.Teoh, R.H.Huang, K.L.Hsueh, K.H.Yang, W.K.Chao, F.S. Shieu // Int. J. Hydrogen Energy, 2014, Vol. 39, № 36, pp. 21177-21184.
3. O.K.Alekseeva, E.K. Lutikova, V.V.Markelov, V.I.Poremsky, V.N. Fateev // Int. J. Electrochem. Sci, 2018, Vol. 13, pp. 797-811.

Д.С. КАМБАР, Т.Е. СЕЙСЕМБЕКОВА, С.К. ТАЖИБАЕВ, Т.М. МУКАМЕТКАЛИ,
А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ

Карагандинский университет им. академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНОГО ФОТОЭЛЕКТРОДА $ZnO:SnO_2$

Объектами исследования являлись нанокompозитные материалы и инвертированные солнечные ячейки на основе оксидов металлов $ZnO:SnO_2$. Золь-гель методом синтезированы тонкие пленки оксида цинка и олова. Исследованы оптические свойства полученных наноструктурированных пленок ZnO и SnO_2 . Разработаны оптимальные технологические условия получения нанокompозитных пленок $ZnO:SnO_2$ с развитой поверхностью.

D.S.KAMBAR, T.E.SEISEMBEKOVA, S.K.TAZHIBAYEV, T.M.MUKHAMETKALI,
A.K.ZEINIDENOV

Buketov Karaganda University Karaganda, Kazakhstan

STRUCTURAL FEATURES AND OPTICAL PROPERTIES OF NANOCOMPOSITE PHOTOELECTRODE $ZnO:SnO_2$

The objects of the study were nanocomposite materials and inverted solar cells based on metal oxides $ZnO:SnO_2$. Thin films of zinc oxide and tin were synthesized by the sol-gel method. The optical properties of the obtained nanostructured ZnO and SnO_2 films are investigated. Optimal technological conditions for the production of $ZnO:SnO_2$ nanocomposite films have been developed with a developed surface.

На рисунке 1 представлены СЭМ изображения поперечного скола пленок (а) и энергодисперсионной анализ композитных пленок $ZnO:SnO_2$ (b). Толщина нанесенного полимера ZnO составляла 86 нм, а толщина SnO_2 составляла 93 нм. Для определения состава веществ на поверхности подложек был проведен энергодисперсионной анализ. Элементный анализ образцов проводился с помощью энергодисперсионного анализатора INCA Penta FET-x3 (Oxford Instruments, Англия). Как показали данные энергодисперсионного анализа, в составе пленки присутствуют Zn, Na, Sn, O, Si, C.

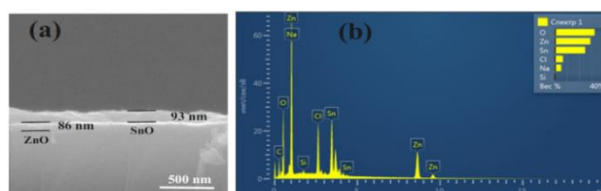


Рисунок 1 - Энергодисперсионный анализ поверхности композитных пленок $ZnO:SnO_2$

На рисунке 2 показаны спектры поглощения пленок ZnO , SnO_2 и их композитов $ZnO:SnO_2$. Край полосы поглощения приходится для всех пленок на 380-400 нм, что соответствует оптическому переходу запрещенной зоны полупроводников. Из рисунка видно, что форма спектров поглощения композитных пленок не сильно отличается от спектров поглощения индивидуальных полупроводниковых оксидов.

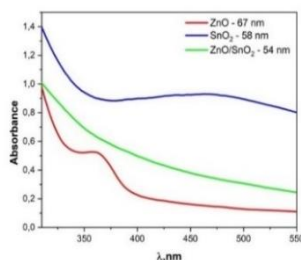


Рисунок 2 - Спектры поглощения пленок ZnO , SnO_2 и их композитов $ZnO:SnO_2$

Методом золь-гель разработаны методы синтеза пленок $ZnO:SnO_2$. Разработаны оптимальные технологические условия получения нанокompозитных пленок $ZnO:SnO_2$ с развитой поверхностью. Показано, что край полосы поглощения композитных пленок приходится на 380-400 нм.

Список литературы

- 1 S.A. Kim, M. A. Abbas, L. Lee, B. Kang, H. Kimc, J.H. Bang // Control of morphology and defect density in zinc oxide for improved dye-sensitized solar cells // Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, Vol. 18(44), pp. 30475-30483. DOI: 10.1039/C6CP04204J.
- 2 V. Rogé, J. Didierjean, J. Crépellière, D. Arl, M. Michel, I. Fechete, A. Dinia, D. Lenoble // Tuneable Functionalization of Glass Fibre Membranes with ZnO/SnO_2 Heterostructures for Photocatalytic Water Treatment: Effect of SnO_2 Coverage Rate on the Photocatalytic Degradation of Organics // Catalysts, 2020, Vol. 10(733), pp. 1-18. DOI: 10.3390/catal10070733.

А. КАРАДЖИЧ, В.В. ФИЛАТОВ

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

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ COVID-19 НА ОСНОВЕ ГИПЕРКОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ПОЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ИНКАПСУЛИРОВАННОЙ РНК SARS-COV-2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ ПОДЛОЖКИ

Предлагается экспресс-метод детектирования, а также подавления активности вирионов SARS-CoV-2 на основе гиперкомбинационного рассеяния света на полярных колебаниях РНК коронавируса с использованием фотонного кристалла в качестве активной подложки.

A. KARADZIC, V.V. FILATOV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

OPTICAL TECHNIQUE TO FAST DIAGNOSE AND TO CURE COVID-19 HYPER-RAMAN WAYTHROUGH A PHOTONIC CRYSTAL AS AN ACTIVE SUBSTRATE

The paper proposes to diagnose and to cure COVID-19 by an optical way via Raman scattering on the SARS-CoV-2 RNA polar modes with a photonic crystal as an active substrate.

SARS-CoV-2 – одноцепочечный (+) РНК-вирус сферической формы (рис.1, А) с шиповидными отростками (В), вызывающий острый респираторный синдром COVID-19. В данной работе предлагается экспресс-метод определения вирионов коронавирусной инфекции в окружающем и/или выдыхаемом пациентом воздухе на основе гиперкомбинационного рассеяния света (ГКР) на оптически-активных собственных колебаниях РНК SARS-CoV-2.

Для нахождения спектрального положения полярных мод инкапсулированной РНК нами были произведены модельно-независимые оценки [1] (справедливые для всех известных, а также вновь возникающих штаммов коронавируса), а также модельно-зависимые расчеты [2] динамики оптических электронов, показавшие присутствие в РНК коронавируса оптически-активных мод, расположенных в гигагерцовой области спектра. Тем самым, имеется возможность определения вирионов коронавируса в окружающем воздухе с высокоточным [3] установлением их концентрации (показывающей степень поражения организма заболевшего) по спектрам ГКР. В качестве активной подложки мы предлагаем использовать глобулярный фотонный кристалл на основе искусственного опала, синтезированный таким образом, чтобы спектральное положение его запрещенной фотонной зоны соответствовало положению полярных мод РНК [4]. В этом случае поверхностные высокоэнергетические оптические таммовские состояния фотонного кристалла могут быть непосредственно использованы для подавления активности коронавируса посредством стохастического резонансного оптического возбуждения полярных мод РНК.

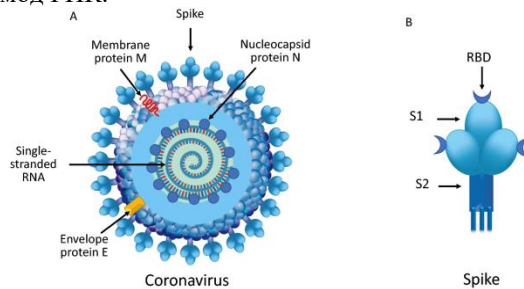


Рис.1. Схематичный рисунок строения вириона коронавируса [5]. Инкапсулированная РНК на рис. А в центре

Список литературы

1. А. Караджич, В.В. Филатов // Анализ возможности использования фотонных кристаллов для обнаружения и подавления активности вирионов SARS-CoV-2 // Материалы 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 2022.
2. B.D. Xue, V. Filatov, A. Karadzic, W.M. Yuan // Analysis of the possibility to detect and photodeactivate SARS-CoV-2 virions by the photonic crystals // Submitted to International Conference on Advanced Materials Science and Engineering, 2022.
3. K. Sugioka, S. Bai // 3D microfluidic SERS chips fabricated by hybrid femtosecond laser processing for attomolar sensing // Abstracts of V International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2021», 2021.
4. Би Дунсюэ, У Мэнюань, А. Караджич, В.В. Филатов // Глобулярный фотонный кристалл как перспективная среда для получения гигантского комбинационного рассеяния // Сборник научных трудов VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 2021, Ч. 1, стр. 205-206.
5. SARS-CoV-2 // Википедия.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК WS₂/C

Исследованы закономерности формирования тонких слоев с ламинарной упаковкой атомов на основе дисульфида вольфрама и графитоподобного углерода при использовании метода реакционного импульсного лазерного осаждения при варьируемой (300–600°C) температуре подложки. Созданы многослойные пленки, содержащие кристаллические слои 2H-WS₂ и углерода толщиной до 20 нм, и исследованы их трибологические свойства на воздухе и в атмосфере азота. Установлено, что комбинирование базисно-ориентированных нанослоев WS₂, обладающих достаточно совершенной кристаллической структурой, и углерода позволяет нивелировать существенную зависимость коэффициента трения от среды трибоиспытаний, который составлял при трении скольжения 0,02–0,03.

R.I. ROMANOV, D.V. FOMINSKI, V.A. KASYANENKO, V.YU. FOMINSKI
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF NANOLAYERED WS₂/C FILMS

The regularities in the formation of thin layers with laminar packing of atoms based on tungsten disulfide and graphite-like carbon were studied using the method of reactive pulsed laser deposition at a variable (300–600°C) substrate temperature. Multilayer films containing crystalline 2H-WS₂ and carbon layers up to 20 nm thick have been created, and their tribological properties have been studied in air and in a nitrogen gas atmosphere. It has been found that the combination of base-oriented WS₂ nanolayers, which have a fairly perfect crystalline structure, and carbon makes it possible to level out the significant dependence of the friction coefficient on the tribotest medium, and it was 0.02 – 0.03 for sliding friction.

В последнее время возрастает интерес и повышается значимость проблемы формирования достаточно тонких покрытий, обеспечивающих сверхнизкий коэффициент трения при различных условиях испытаний, включая вакуум, инертный газ, азот или воздух различной влажности. Такие покрытия востребованы в космической технике, точном машиностроении, микро-электромеханических устройствах и пр. Одно из решений этой проблемы связывают с формированием слоистых покрытий, в которых возможно независимое регулирование характеристики компонентов, которые должны обеспечить самоадаптацию покрытия к различным условиям трибоиспытаний. Очевидно, что в такой архитектуре покрытий возникают проблемы совместимости материалов слоев, необходимой для обеспечения адгезии/когезии и синергетического взаимодействия в зоне триб-индуцированных изменений (трибопленке). В работе созданы и исследованы нанослойные покрытия, содержащие базисно-ориентированные слои твердосмазочного WS₂ и графитоподобного углерода. Проведены структурные исследования осажденных пленок методами рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния света. Исследована зависимость структурно-фазовых характеристики слоев WS₂ от условий реакционного импульсного осаждения в сероводороде из мишеней W и WO₃. На рис. 1 представлены результаты трибоиспытаний созданных покрытий по методике обратного-поступательного скольжения шарика по подложке (кремнию) с покрытием.

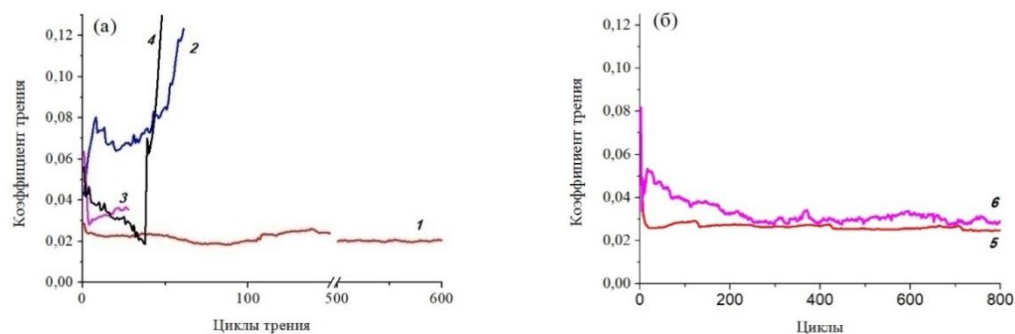


Рис. 1. Результаты трибоиспытаний (а) тонкопленочных покрытий WS₂, полученных при 600°C (1,2) и 300°C (3,4) и (б) многослойных покрытий WS₂/C, полученных при 500°C (5,6). Испытания проведены в среде азота (1, 3, 5) и на воздухе (2, 4, 6). Нагрузка на контртелло-шарик составляла 5 Н.

Закключение. Для формирования тонкопленочных покрытий на основе WS₂, обладающими качественными антифрикционными свойствами в среде азота, необходимо обеспечить нагрев подложек до температур ~500°C, что способствует формированию базисно-ориентированной достаточно совершенной кристаллической структуры. Такие пленки WS₂ могут применяться для создания нанослойных покрытий в комбинации с графитоподобным углеродом, который обеспечивает низкое трение во влажном воздухе и не снижает эффективность WS₂ в среде азота.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №22-29-00197).

И.О. КЕССЛЕР, В.В. НИФТАЛИЕВА, Ю.В. МОРОЗОВА, В.С. КЛИМИН

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, Таганрог, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАНОРАЗМЕРНОГО МИКРОПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК Si С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ВО ФТОРИДНОЙ ПЛАЗМЕ

Была проведена плазмохимическая обработка кремниевых подложек с модифицированными областями во фторидной плазме при ускоряющем напряжении. Исследование полученной морфологии проводилось на установке атомно-силовой микроскопии (АСМ). В результате были выявлены зависимости шероховатости, угла наклона и высоты структур от скорости и времени обработки.

I.O. KESSLER, V.V. NIFTALIEVA, J.V. MOROZOVA, V.S. KLIMIN

Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation of the Southern Federal University, Taganrog, Russia

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF NANOSCALE MICROPROFILING OF THE SURFACE OF SiC SUBSTRATES USING THE PLASMA CHEMICAL METHOD IN FLUORIDE PLASMA

Plasma-chemical treatment of silicon substrates with modified regions in fluoride plasma under accelerating voltage was carried out. The study of the obtained morphology was carried out at the atomic force microscopy (AFM) facility. As a result, the dependences of roughness, angle of inclination and height of structures on the speed and time of processing were revealed.

Требование к миниатюризации полупроводниковых пластин является основным конструкторским направлением нанoeлектроники. Исследование наноструктур на подложках путём микропрофилирования остаётся одним из важнейших вопросов в области обработки твердотельных структур [1,2].

В плазмохимической обработке во фторсодержащей плазме использовались кремниевые пластины, модифицированные фокусированным ионным пучком Ga⁺ в области 5x5 мкм при количестве проходов пучка N-50 с дозой 12,5 пКл/мм², током ионного пучка I_{иП} – 10 пА и ускоряющим напряжением U_{уН} - 10 ÷ 30 кэВ. Обработка проводилась при условиях: поток фторсодержащего газа N_{SF6} - 15 см³/мин, потока аргона N_{Ar} - 100 см³/мин, давление в реакторе P - 2 Па, мощность источника индуктивно-связанной плазмы W_{исП} – 250 Вт, мощность источника емкостной плазмы W_{есП} – 25 Вт, напряжение смещения U_{см} – 16 В, время обработки - 15 ÷ 180 секунд.

На рисунке 1 показаны СЭМ-изображения и АСМ-изображения поверхности образца.

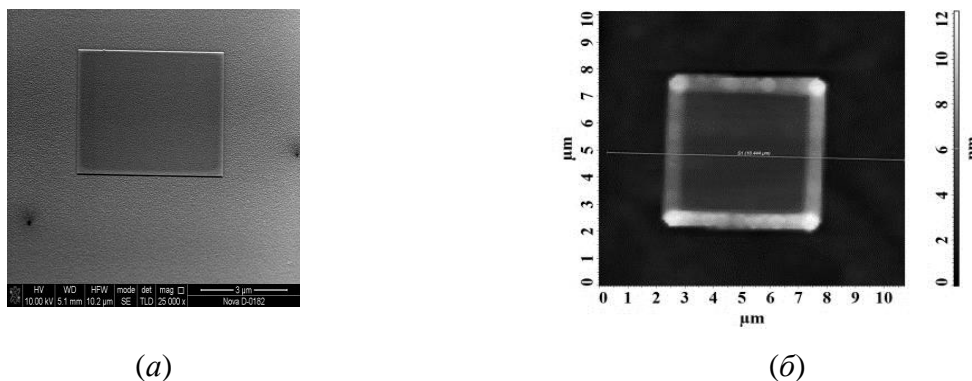


Рис. 1. Структура поверхности кремния после локальной модификации методом ФИП при ускоряющем напряжении 10 кэВ и плазмохимической обработки во фторсодержащей плазме в течение 45 секунд: (а) СЭМ - изображение; (б) АСМ – изображение

Экспериментальные исследования позволили установить закономерности влияния режимов плазмохимической обработки, на геометрические параметры полученных на поверхности пластин кремния. Были определены режимы, соответствующие минимальной и максимальной шероховатости вытравленной поверхности. Для достижения максимальной шероховатости необходимо увеличивать значения параметров реактивного ионного травления, а для минимальной шероховатости – увеличивать значения параметров плазмохимического травления.

Список литературы

1. L.A.Giannuzzi, F.A.Stevie // Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice // New York: Springer, 2004, p. 357.
2. V.S. Klimin, A.A. Rezvan, O.A. Ageev // Research of using plasma methods for formation field emitters based on carbon nanoscale structures // J. of Phys: C.S, 2018. V.1124. – P. 071020.

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ¹, А.Д. СЫТЧЕНКО¹, Р.А. ВАХРУШЕВ¹,
П.А. ЛОГИНОВ¹, А.С. ОРЕХОВ², Е.А. ЛЕВАШОВ¹

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, Россия

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОХОДЯЩИЕ В НАНОПЛЁНКАХ MoZrHfYSiB ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ

Проведено исследование термической стабильности и диффузионно-барьерных свойств жаростойких покрытий MoZrHfYSiB с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, в том числе в режиме in-situ, электронной и рентгеновской дифракции, спектроскопии комбинационного рассеяния света, инфракрасной и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, наноиндентирования. Установлены температурные зависимости структурных параметров и механических характеристик покрытий. Исследовано диффузионное взаимодействие покрытий с компонентами подложки при нагреве.

PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV¹, A.D. SYTCHENKO¹, R.A. VAKHRUSHEV¹, P.A. LOGINOV¹, A.S.
OREKHOV², E.A. LEVASHOV¹

¹National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

²Shubnikov Institute of Crystallography of RAS, Moscow, Russia

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS AND DIFFUSION PROCESSES TAKING PLACE IN MoZrHfYSiB NANOFILMS UNDER HIGH-TEMPERATURE HEATING

Thermal stability and diffusion-barrier properties of MoZrHfYSiB oxidation-resistant coatings have been studied using high-resolution transmission electron microscopy, including in-situ mode, electron and X-ray diffraction, Raman spectroscopy, infrared and X-ray photoelectron spectroscopy, nanoindentation. Temperature dependences of structural parameters and mechanical characteristics of coatings are established. The diffusion interaction of coatings with substrate components under heating is investigated.

Целью данной работы является комплексное исследование термической стабильности структуры и свойств, а также диффузионного взаимодействия между компонентами покрытия и подложки при высокотемпературном нагреве покрытий MoZrHfYSiB, включая прямое наблюдение в режиме in-situ в колонне электронного микроскопа.

Для нанесения покрытий применялся метод магнетронного напыления в режиме постоянного тока (DCMS) и высокомономпульсном режиме (HIPIMS). Многофазные мишени были изготовлены путём горячего прессования композиционного порошка, полученного при измельчении СВС-продуктов. Легирующие элементы (Hf, Zr, Y) вводились в состав шихты при изготовлении мишеней, также применялся подход с использованием мозаичных катодов, содержащих металлические сегменты. Распыление мишеней проводилось с помощью вакуумной установки типа УВН-2М, оснащённой ионным источником щелевого типа для очистки подложек и магнетронными системами. При DCMS ток на магнетрон составлял 2 А, напряжение 500 В, пиковая/средняя мощность при HIPIMS достигала 70/1 кВт, использовалась атмосфера Ar (99,9995%), рабочее/остаточное давление в вакуумной камере составляло 0,2/0.005 Па. Фольги для микроскопии были подготовлены методом FIB (FEIQuanta 200 3D). In-situ исследование тонкой структуры и фазового состава покрытий проводилось с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 JEOL, оборудованного модулем для нагрева (Gatan), в диапазоне температур, T=20-1000°C. При каждой T производилась запись микроизображений, картин электронной дифракции, а также Фурье-анализ. Покрытия подвергались нагреву в стационарных условиях, при тех же T и выдержках в условиях вакуума и на воздухе. До и после термической обработки проводились исследования методами оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда, рентгенофазового анализа, Рамановской спектроскопии, инфракрасной спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, наноиндентирования. Установлена взаимосвязь между концентрацией легирующих элементов, структурными особенностями и фазовыми превращениями, происходящими при нагреве. Изучен и объяснён механизм самоупрочнения. Обнаружено, что HIPIMS покрытия по термической стабильности и диффузионно-барьерным свойствам превосходят образцы DCMS.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания № 0718-2020-0034.

А.Н. КИРЯКОВ¹, А.Ф.ЗАЦЕПИН¹, Т.В. ДЬЯЧКОВА², А.П. ТЮТЮННИК²

¹Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

²Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

ТЕРМОБАРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГРАФЕНОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В НАНОКЕРАМИКЕ $MgAl_2O_4$

Методом термобарического синтеза смеси нанопорошков графена и алюмомагниевого шпинели синтезирован оптически-прозрачный композит $MgAl_2O_4$:Graphene. Комплексный анализ структурных и электронно-оптических свойств нанокompозита свидетельствует о формировании графеновых квантовых точек в результате термобарического воздействия.

A.N. KIRYAKOV¹, A.F. ZATSEPIN¹, T.V. DYACHKOVA², A.P. TYUTYUNNIK²

¹Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

²Institute of Solid State Chemistry of Ural Branch of Academy Science, Yekaterinburg, Russia

THERMOBARICAL SYNTHESIS OF GRAPHENE QUANTUM DOTS IN $MgAl_2O_4$ NANOCERAMIC

An optically transparent $MgAl_2O_4$:Graphene composite was synthesized by the method of thermobaric synthesis of a mixture of graphene nanopowders and aluminum-magnesium spinel. A comprehensive analysis of the structural and electron-optical properties of the nanocomposite indicates the formation of graphene quantum dots as a result of thermobaric exposure.

Углеродные низкоразмерные структуры, такие как нанотрубки, фуллерены, квантовые точки, активно исследуются многими научными группами всего мира. Интерес вызван в первую очередь большим разнообразием углеродных низкоразмерных структур, что позволяет добиваться в них уникальных свойств. Углеродные квантовые точки являются перспективным люминесцирующим материалом, характеризующимся высокой степенью биосовместимости, а также повышенным квантовым выходом [1]. Однако, существует ряд фундаментальных проблем, препятствующих внедрению углеродных квантовых точек в технологические процессы. Энергия первого возбужденного состояния углеродной квантовой точки лежит в диапазоне от 5 до 2 eV (в зависимости от размера и модификации). При этом реализация такого перехода возможна в материале, ширина оптической щели которого будет больше этого значения. Одним из возможных кандидатов на роль матрицы для углеродной квантовой точки является класс оксидных широкозонных диэлектриков, типа Al_2O_3 , MgO, SiO_2 , $MgAl_2O_4$. Особенность этих материалов заключается в том, что для получения оптической прозрачности необходим высокотемпературный синтез (свыше 1300°C). При этих температурах углерод вступает в химическую реакцию с матрицей по типу восстановления, с образованием CO, который в свою очередь окисляется до CO_2 , создавая сильную нестехиометрию в оксидном диэлектрике. Понижение температуры синтеза является ключом к сохранению примесного углерода в матрице. В связи с этим целью настоящей работы является получение методом термобарической закалки наноструктурного композита $MgAl_2O_4$ с примесью графена, а также комплексный анализ структурных и оптоэлектронных свойств.

Смесь нанопорошка шпинели и графена была подвергнута термобарическому воздействию при давлении 6 GPa, температуре 600°C, в течение 10 мин. Синтезированный композит состоит из плотноупакованных нанозерен $MgAl_2O_4$ преимущественно в кубической фазе с пространственной группой $Fd-3m$, а также стэков углеродных пластин. Микроструктура композита исследовалась методом РФА, Рамановской спектроскопии, а также СЭМ. Электронная структура исследована методом РФЭС. Оптические характеристики анализировались методом оптической спектроскопии, фотолюминесценции, а также анализа кинетических зависимостей фотолюминесценции.

Обнаружено, что в результате термобарического синтеза оптически-прозрачного композита $MgAl_2O_4$:Graphene формируются графеновые квантовые точки, характеризующиеся распределением по размерам. О наличии графеновых связей в материале свидетельствует характерный РФЭС спектр I_{sc} состояний углерода. В Рамановском спектре также зарегистрированы связанные с графеном колебательные моды. В спектрах фотолюминесценции присутствует набор полос свечения, обусловленный наличием целого ряда оптически-активных центров, связанных, по всей видимости, с присутствием графеновых квантовых точек с распределением по размерам. Кинетика фотолюминесценции обнаруженных полос характеризуется наносекундной постоянной затухания (~4 нс), что хорошо согласуется с литературными данными по углеродным (в частности графеновым) квантовым точкам. Обсуждается механизм формирования графеновых квантовых точек в результате термобарического синтеза нанокompозита.

Таким образом, в настоящей работе было обнаружено, что термобарический синтез наноструктурной $MgAl_2O_4$ с примесью графенового нанопорошка позволяет получать керамический композитный люминофор, свечение в котором обусловлено присутствием графеновых квантовых точек. Распределение квантовых точек по размерам ведет к принципиальной возможности перестройки фотолюминесцентного сигнала в широком спектральном диапазоне.

Список литературы

1. P. Tian et al. // Materials today chemistry, 2018, Vol. 10, pp. 221-258.

О.В. КОПЛАК^{1,2}, Е.В. ДВОРЕЦКАЯ¹, Р.Б. МОРГУНОВ¹

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

²Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

ЛОКАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МИКРОПРОВОДОВ PRDYFECOB

Созданы условия для локальной кристаллизации аморфных микропроводов PrDyFeCoB с помощью лазерных импульсов. Под действием лазерного облучения формируются нанокристаллические магнитные фазы $(\text{PrDy})_2(\text{FeCo})_{14}\text{B}_1$, $(\text{PrDy})_1(\text{FeCo})_2$, $(\text{PrDy})_1(\text{FeCo})_4\text{B}_1$ с увеличенной магнитокристаллической анизотропией. Перпендикулярная составляющая полей рассеяния локальных периодических областей может быть использована для создания программируемых микромагнитов.

O.V. KOPLAK^{1,2}, E.V. DVORETSKAYA¹, R.B. MORGUNOV¹

¹Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia

²First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

LOCAL LASER CRYSTALLIZATION OF PrDyFeCoB MICROWIRES

Local crystallization of PrDyFeCoB amorphous microwires using laser pulses are created. The nanocrystalline magnetic phases $(\text{PrDy})_2(\text{FeCo})_{14}\text{B}_1$, $(\text{PrDy})_1(\text{FeCo})_2$, $(\text{PrDy})_1(\text{FeCo})_4\text{B}_1$ with increased magnetocrystalline anisotropy are formed under the laser irradiation. The perpendicular component of the stray fields of local periodic regions allows one to design programmable microstructures.

Селективное лазерное плавление (SLM), также известное как аддитивная технология, может быть применено для создания микромагнитов с программируемой формой и заданной намагниченностью [1]. Микропровода PrDyFeCoB, обладающие высокой остаточной намагниченностью и прямоугольной петлей гистерезиса имеют большой потенциал их использования в биологии и медицине [2-4]. Магнитная модуляция микропроводов PrDyFeCoB позволяет расширить их функциональные свойства. С помощью иттербиевого импульсного лазерного лазера на поверхности одиночного микропровода были созданы периодические участки с разной кристаллической структурой. Аморфные области (рис.1а) чередовались с областями с кристаллическими включениями (рис.1б). Под действием лазерного излучения исходно аморфный материал преобразуется в микрокристаллическое состояние (рис.1б) с образованием ферромагнитных фаз $(\text{PrDy})_2(\text{FeCo})_{14}\text{B}_1$ и $(\text{PrDy})_1(\text{FeCo})_2$, $(\text{PrDy})_1(\text{FeCo})_4\text{B}_1$. Это соответственно приводит к изменению петли гистерезиса, записанной в локальной облученной и необлученной областях, с помощью магнитооптического микроскопа Керра (рис.1.с).

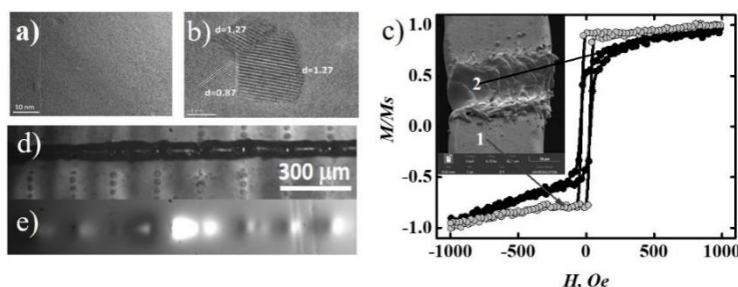


Рис. 1. Электронное изображение (а) исходного аморфного микропровода и (б) после лазерного облучения. Полевые зависимости локального магнитного момента (с), нормированного на магнитный момент насыщения M_S при 50 кОе для необлученных (1) и облученных (2) участков одного и того же микропровода. Оптическое (d) и магнитооптическое (е) изображение в поле 120 Ое модулированного микропровода.

Насыщение намагниченности в облученной области достигается в поле $H_A = 500$ Ое, что больше на $H_A = 20-30$ Ое чем в необлученной области того же микропровода (рис.1с). Причиной изменения локальных магнитных свойств является появление магнитокристаллической анизотропии в нанокристаллических областях, образованных после лазерного облучения. Появление радиальной компоненты намагниченности в облученных областях подтверждено методом магнитооптических индикаторных пленок (рис. 1 е). Периодические темные и светлые области соответствуют сериям магнитных диполей на поверхности микропровода. Принцип локальной лазерной кристаллизации аморфных редкоземельных микромагнитов может быть использован для конструирования кончиков микропинцетов, необходимых в биологии и медицине. Магнитомодулированные микропровода могут служить прототипом подвижной части линейных микроэлектродвигателей.

Список литературы

1. H. Palneedi, J. Hwan, P. Deepamand others // Adv. Mater, 2018, Vol. 30, p. 1705148
2. O. Koplak, R. Morgunov, I. Khodos // Mat. Lett, 2021, Vol. 301, p. 130291.
3. R.B. Morgunov, O.V. Koplak // Mat. Sci. and Eng. B, 2021, Vol. 263, p. 114845.
4. R.B. Morgunov, O.V. Koplak // Mat. Lett., 2020, Vol. 273, p. 127954.

В.О. КОПЫТСКИЙ, Е.В. ПЕТРОВ

Институт структурной макрокинетики проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ МЕТАНИЯ ПЛАСТИНЫ-УДАРНИКА РАЗОГНАННОЙ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА

Проведены эксперименты по метанию пластины-ударника, разогнанной энергией взрыва заряда взрывчатого вещества аммонита 6ЖВ, на бронзовые цилиндрические образцы марок БрАЖ9-4 и БрАМц9-2, которые фиксировались на высокоскоростную электронную камеру Наногейт-4БП. Полученные результаты позволили экспериментально оценить скорость полета пластины-ударника.

V.O. KOPYTSKIY, E.V. PETROV

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

STUDY OF THE FLYER PLATE VELOCITY ACCELERATED BY THE EXPLOSION ENERGY

Experiments on throwing a flyer plate, accelerated by the explosion energy of the ammonite 6ZHВ explosive charge, on bronze cylindrical samples grades BRAZH9-4 and BRAMTS9-2 were carried out. Which were recorded on a high-speed electronic camera Nanogate-4BP. The results obtained made it possible to experimentally estimate the flight velocity of the flyer plate.

Взрывное нагружение осуществлялось ударом алюминиевой пластины, разогнанной зарядом взрывчатого вещества. Подобная схема позволяет инициировать образование откольной повреждаемости в материале. Исследование образования откольной повреждаемости в бронзе может помочь разработать принцип защиты от иглоподобной откольной повреждаемости, а также сохранить целостность материала на начальной стадии разрушения, и тем самым продлить срок службы изделий из бронзовых сплавов.

В экспериментах по ударно-волновому нагружению с помощью метания алюминиевой пластины-ударника ($h = 2$ мм; $d = 25$ мм), нагружались цилиндрические образцы из бронзовых сплавов БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 ($h=40$ мм; $d=25$ мм), с отверстием в центре ($d = 8$ мм), которое необходимо для создания дополнительных свободных поверхностей. В качестве взрывчатого вещества использовался аммонит 6ЖВ, со скоростью детонации 3,6-4,8 км/с. Полет пластины-ударника фиксировался на высокоскоростную электронную камеру Наногейт-4БП, которая позволяет сделать 4 снимка за время проведения эксперимента (рис. 1).

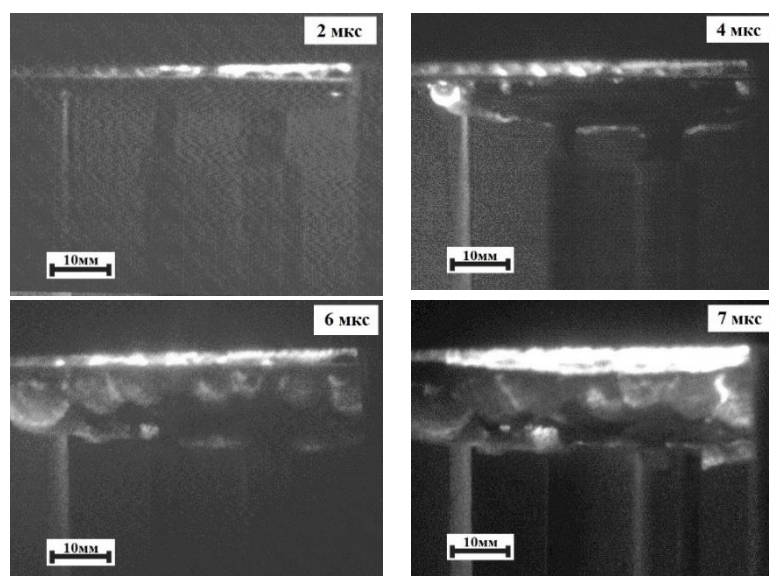


Рис. 1. Фотографии полета пластины-ударника, зафиксированные с шагом в несколько микросекунд.

Из полученных кадров была оценочно рассчитана скорость полета пластины-ударника: между 1 и 2 кадром, после детонации заряда взрывчатого вещества, скорость составляла 1,45 км/с; между 2 и 3 кадром, заметно, что продукты взрыва начинают обгонять и перекрывать ударник, скорость составляла 1,94 км/с; между 3 и 4 кадром, скорость равна 1,13 км/с; на 4 кадре, заметно резкое падение скорости, что может быть связано со столкновением пластины непосредственно с образцом. Средняя рассчитанная скорость полета пластины-ударника составляет 1,5 км/с, что коррелирует с теоретическими расчетами. Соударение пластины-ударника с такой скоростью генерирует достаточное нагружение для образования откольной повреждаемости в бронзе.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЗМ ИЗ ФГ

Рассмотрена переработка фосфогипса с извлечением из него редкоземельных металлов. Исследовано влияние концентрации азотной кислоты на степень извлечения редкоземельных металлов с целью определения технологических параметров переработки фосфогипса.

V.R. KRIPAK, N.A. SHCHERBINA, A.V. VALKOV, N.A. ONOPRIENKO
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

ACID CONCENTRATION INFLUENCE ON EFFECTIVENESS OF RARE EARTH METALS EXTRACTION FROM PHOSPHOGYPSUM

Phosphogypsum processing with rare earth metals recovery is studied. Acid concentration influence on effectiveness of rare earth metals extraction is investigated with a view to discovering optimal technological parameters for phosphogypsum treatment.

Редкоземельные металлы (РЗМ) являются стратегически важным ресурсом, находящим множество применений: они используются для производства постоянных магнитов, в роли, для создания никель-металлгидридных аккумуляторов, полировки оптики и улучшения качеств сплавов, в медицине применяются их люминофорные свойства [1].

Ежегодно в мире перерабатывается около 8,5 Мт апатита. При сернокислотной обработке образуется фосфогипс (ФГ) – экологически вредный продукт, содержащий примеси фтора и фосфора. Фтор выщелачивается и проникает в почвенные воды, а пылевидные частицы фторида кальция переносятся воздушными потоками, что вызывает состояние «экологического неблагополучия» в окрестности предприятия [2].

В процессе получения 1 тонны фосфорной кислоты образуется около 5 тонн ФГ, мировое производство ФГ оценивается примерно в 100–280 Мт в год. На сегодняшний день используется лишь около 15% мирового производства ФГ. Уменьшение объемов утилизации ФГ принесет экономические и экологические выгоды [3].

Наибольшая часть затрат в современной промышленности получения РЗЭ падает на добычу руды и ее обогащение. Использование техногенного сырья может нести значительные экономические выгоды [4].

ФГ может быть вторичным источником РЗЭ с концентрацией от 0,01 до 0,1% (100–1000 мг/кг). Преимуществом использования фосфатной руды в качестве источника РЗЭ является низкая концентрация радиоактивного тория (Th), обычно обнаруживаемого в минералах РЗЭ [5]. Если предположить, что среднее содержание РЗЭ в ФГ составляет 0,05% (500 мг/кг), потенциально из ФГ ежегодно можно получать до 140 000 тонн РЗЭ [6]. На сегодняшний день наиболее широко для извлечения РЗМ из ФГ используется выщелачивание серной кислотой [7]. Важный недостаток всех сернокислотных методов заключается в трудностях эффективной регенерации или утилизации кислоты.

В данной работе рассматривается переработка ФГ с извлечением из него РЗМ. Объектом исследования является гипс технический ТУ 2141-693-00209438-2015 из отвалного ФГ Балаковского филиала АО «Апатит», содержащий массовые доли CaSO₄ (50%), H₂O (20%), фосфатов (не более 1,5%), фтористых соединений (не более 0,8%).

В работе исследуется влияние концентрации азотной кислоты на степень извлечения РЗМ с целью определения технологических параметров переработки ФГ. Работа осуществлялась по следующим стадиям: подготовка сырья; соединение ФГ с кислотой; проведение реакции перевода РЗМ в раствор; разделение образовавшейся суспензии на рабочий раствор и нерастворимый осадок, являющийся двуводным гипсом без содержания РЗМ; исследование содержания РЗМ в рабочем растворе методом ИСР-спектрометрии; расчет степени извлечения РЗМ из ФГ.

Результаты подтверждают влияние концентрации кислоты на степень извлечения РЗМ из ФГ. Таким образом, переработкой ФГ можно получить до 5% ценного компонента, а оставшиеся 95% становятся гипсовым вяжущим.

Список литературы

1. J. Lucaset al. // Rare Earths: Science, Technology, Production and Use, 2015. DOI: 10.1016/C2012-0-02577-X
2. А.В. Вальков и другие // К проблемам переработки фосфогипса, 2021.
3. Н. Tayibietal // Environmental impact and management of phosphogypsum // Journal of Environmental Management, 2009, Vol. 90, Issue 8.
4. В.М. Веселов и другие // Способ извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса, 2012.
5. Al. Thyabat, P. Zhang // Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2015, Vol. 124. DOI: 10.1179/174328515Y.0000000002
6. Y. Xiaosheng // Natural Resources, 2019, Vol. 10. DOI:10.4236/nr.2019.109021
7. A.V. Valkov et al. // Procedia Chemistry, 2014, Vol. 11, p. 176-181. DOI:10.1016/j.proche.2014.11.031

СВОЙСТВА АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Из металлургических техногенных отходов с применением фторидной технологии синтезированы высокодисперсные порошки аморфного диоксида кремния (SiO_2) высокой чистоты. Показано, что извлечение SiO_2 зависит от концентрации гексафторсиликата аммония при его гидролизе. Установлены основные текстурные характеристики полученных порошков SiO_2 , распределение их частиц по размерам, летучие продукты с поверхности порошков и другие их характеристики.

M.SH. KURBANOV, U.M. NURALIEV, Zh.A. PANZHIEV, S.A. TULAGANOV, M. ERNAZAROV

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

PROPERTIES OF SILICON DIOXIDE SYNTHETIZED FROM METALLURGICAL WASTE

Using fluoride technology, highly dispersed powders of high purity amorphous silicon dioxide (SiO_2) were synthesized from metallurgical industrial wastes. It is shown that the extraction of SiO_2 depends on the concentration of ammonium hex fluorosilicate during its hydrolysis. The main textural characteristics of the obtained SiO_2 powders, the size distribution of their particles, volatile products from the surface of the powders, and their other characteristics are established.

Аморфный SiO_2 , в отличие от его кристаллической формы, обладает развитой поверхностью. Особенности поверхностной структуры и физико-химических свойств делают SiO_2 хорошим сорбентом, широко применяемым в медицине, фармацевтике и в различных отраслях промышленности. Свойства поверхности дисперсного аморфного SiO_2 (гидроксильный покров, активные центры поверхности), развитая удельная поверхность, объем пор, плотность и т. д. играют определяющую роль при взаимодействии с различными веществами и в значительной степени зависят от химического состава, свойств используемого исходного материала, а также условий и технологии синтеза.

В связи с широким спектром применения этого материала, исследования по разработке новых ресурсо- и энергосберегающих технологий синтеза SiO_2 вызывают большой интерес, как у исследователей, так и у потребителей этого продукта. При этом особое внимание уделяется технологиям, не требующим применения специального исходного сырья и большого набора реагентов.

В данной работе приводятся результаты исследований свойств аморфного SiO_2 , синтезированного из металлургических техногенных отходов с использованием фторидной технологии и единственного реагента - фторида аммония. В качестве исходных материалов были использованы медные шлаки и микрокремнезем, представляющий собой пылевидные отходы производства ферросилиция ФС65.

Синтез дисперсного SiO_2 проводился на установке, разработанной и изготовленной нами для переработки медных шлаков Алмалыкского ГМК с применением фторидной технологии. Фторирование сырья проводилось при температурах до 200°C до образования порошкообразного пека, затем полученные смеси фтораммонийных соединений Si обрабатывались при $320-400^\circ\text{C}$ до сублимационного отделения гексафторсиликата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$. После гидролиза $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ в аммиачном растворе и фильтрации получали дисперсные порошки SiO_2 .

Проведенные исследования показали, что синтезированный диоксид кремния имеет высокую степень чистоты ($\approx 99.97\%$) и является аморфным, что подтверждается данными масс-спектрометрии и рентгенофазового анализа.

Показано, что эффективность процесса гидролиза $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ зависит от времени и концентрации аммиака. При этом максимальное извлечение SiO_2 , равное 98% , составляет при концентрации гексафторсиликата аммония $3 \text{ масс.}\%$. Дальнейшее увеличение концентрации $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ до $30 \text{ масс.}\%$ приводит к уменьшению количества извлекаемого SiO_2 до $75 \text{ масс.}\%$. Таким образом, увеличение концентрации в растворе при гидролизе в 10 раз приводит к уменьшению выхода порошков SiO_2 на 25% .

Установлено, что распределение частиц по размерам аморфного SiO_2 в водной среде является би- и тримодальным и преимущественно представлен агломератами с размерами 1300 и 5500 нм , а также присутствуют агрегаты размером $130-250 \text{ нм}$.

ИК - спектры синтезированных порошков имеют характерные полосы, относящиеся к деформационным колебаниям Si-O-Si при 468 см^{-1} (интенсивная) и O-Si-O при 800 см^{-1} (средняя интенсивность), а также полосы валентных колебаний Si-O-Si в диапазоне $1000-1200 \text{ см}^{-1}$, отвечающие за реакционную способность. Обнаружено, что процесс термодесорбции с поверхности порошков SiO_2 проходит в две или стадии, при этом основными летучими продуктами десорбции до 600°C являются H_2O , H_2 , O , OH , CO_2 и CO_5 .

На основе низкотемпературной адсорбции азота определены основные текстурные характеристики полученных порошков. Показано, что форма изотермы адсорбции и петли гистерезиса соответствует текстурной пористости агрегатов непористых наноматериалов. Изотерма адсорбции позволила рассчитать величину удельной поверхности по БЭТ ($64 \text{ м}^2/\text{г}$) и по Легмюру ($93 \text{ м}^2/\text{г}$), общий объем пор, микропор и общую площадь микропор.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА СПЕКТРЫ ГИПЕРУСИЛЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

В данной работе были исследованы наночастицы титаната бария, покрытые наностержнями из серебра, в качестве усиливающей среды для поверхностно-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния (SERS). Использование разных длин волн возбуждения спектров комбинационного рассеяния (КР) позволило получить и сравнить спектры SERS и SEHRS.

A.V. KURILOVA, K.A. MALEEVA, I.E. KALIYA, A.YU. DUBOVIK
National Research University ITMO (University ITMO), Saint-Petersburg, Russia

INFLUENCE THE SHAPE AND SIZE OF SILVER NANOPARTICLES ON THE SPECTRA OF HYPER-ENHANCED RAMAN SCATTERING

In this work, we investigated barium titanate nanoparticles coated silver nanorods as an enhancing medium for surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS). The use of different excitation wavelengths of the Raman spectra made it possible to obtain and compare the spectra of SERS and hyper-enhanced Raman scattering (SEHRS).

В нашей работе исследовались наночастицы, которые могут использоваться в качестве среды для поверхностно-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния (SERS). В качестве нелинейной среды способной к генерации второй гармоники использовались наночастицы титаната бария, покрытые наностержнями из серебра, что в некоторой степени повторяет условия эксперимента статьи [1]. Форма и размеры частиц серебра, покрывающих титанат бария, имеет разброс, что можно видеть из спектра поглощения (рис. 1а), который не имеет узкого пика, свидетельствующего о ярко выраженном проявлении плазменного резонанса на определенной длине волны.

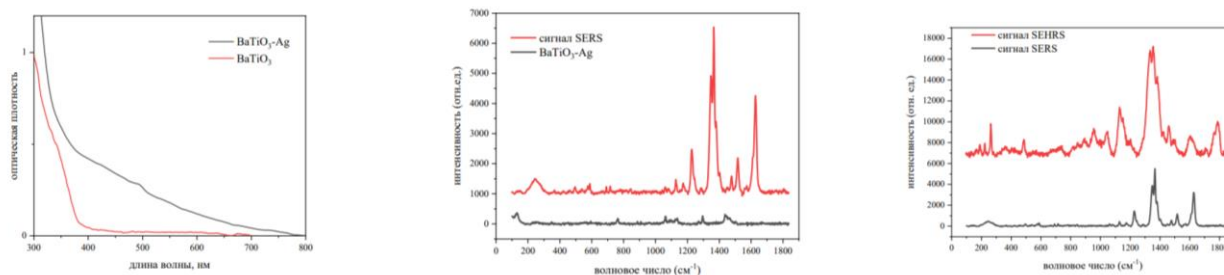


Рис. 1. а) Спектр поглощения водных растворов образцов BaTiO₃-Ag и BaTiO₃; б) Спектры комбинационного рассеяния при возбуждении 514 нм для частиц BaTiO₃-Ag (серый) и BaTiO₃-Ag с нанесенным аналитом (красный); в) Спектры комбинационного рассеяния при возбуждении 514 нм для SERS на BaTiO₃-Ag (серый) и для SEHRS на BaTiO₃-Ag (красный).

Спектр SERS для йодида псевдоцианина соответствует спектрам, полученным ранее [2]. Спектры SEHRS отличаются от спектров SERS увеличенной интенсивностью линии 1366 см⁻¹ и 1362 см⁻¹ (для SERS и SEHRS, соответственно) и появлению нескольких полос, плохо различимых или отсутствующих при возбуждении 514 нм. Эта особенность согласуется с заявленной ранее информацией о наблюдении колебательных полос, которые могут определяться отличными от SERS правилами отбора [3]. В таблице приведены аналитические факторы усиления, рассчитанные по формуле [4] и самые интенсивные линии спектра.

Таблица. Сравнение SERS и SEHRS спектров

Длина волны лазерного возбуждения, нм	Тип	Аналитический фактор усиления	Интенсивная линия в спектре аналита
516	SERS	$1,6 \cdot 10^4$	1366 см ⁻¹
633	SEHRS	$3,2 \cdot 10^4$	1362 см ⁻¹

Из полученных нами результатов хорошо видно, что представленный нами композит может быть использован для получения спектров SEHRS и SERS, что свидетельствует усиление сигнала от ряда линий почти в 2 раза относительно спектров, снятых в режиме SERS (рис. 1в).

Список литературы

1. F. Madzharova, A. Nodar, V. Živanović, M.R. Huang, C.T. Koch, R.Esteban, J. Kneipp // Adv. Funct. Mater, 2019, Vol.29, №49, p. 1904289.
2. K.A. Khnykina, M.A. Baranov, A.A. Babaev, A.V. Baranov, K. V. Bogdanov // Optics and Spectroscopy, 2022, pp. 1-10.
3. J.C. Hulteen, M.A. Young, R.P. Duynen // Langmuir, 2006, Vol. 22, p.10354.
4. J. Langer et al. // Present and future of surface-enhanced Raman scattering //ACS nano, 2019, Vol. 14, №. 1, pp. 28-11.

А.Е. ЛУКЪЯНОВ¹, И.А. КОВАЛЕВ¹, В.Д. НЕВЕРОВ¹, А.В. КРАСАВИН¹,
Я.В. ЖУМАГУЛОВ^{1,2}, Д. КОЧАН²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Университет Регенсбург, Регенсбург, Германия

ХАББАРДОВСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ ОТ ДЫШАЩЕЙ МОДЫ В ВАБИО₃

В работе представлено теоретическое исследование электронных свойств соединения ВаБиО₃ в зависимости от амплитуды дышащей моды – длины связи Bi-O.

A.E. LUKIANOV¹, I.A. KOVALEV¹, V.D. NEVEROV¹, A.V. KRASAVIN¹,
Y.V. ZHUMAGULOV^{1,2}, D. KOCHAN²

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

²University of Regensburg, Regensburg, Germany

STRENGTH OF THE HUBBARD POTENTIAL AND ITS MODIFICATION BY BREATHING MODE IN ВаBiO₃

A theoretical research of the electronic properties of ВаBiO₃ compound depending on the amplitude of the breathing mode – the length of Bi-O bond – is presented.

Показано, что кулоновское взаимодействие в ВаБиО₃ имеет значительную силу и влияет на основные электронные свойства соединения, в том числе на электрон-фононное взаимодействие. Матричные элементы кулоновского взаимодействия рассчитаны на основе полученных из первых принципов максимально локализованных орбиталей Ванье для различных амплитуд дышащей моды – длины связи Bi-O (рис. 1); матричные элементы экранированного кулоновского взаимодействия получены аналитически с использованием модельной диэлектрической функции. Получена количественная оценка величины эффективного Хаббардовского потенциала.

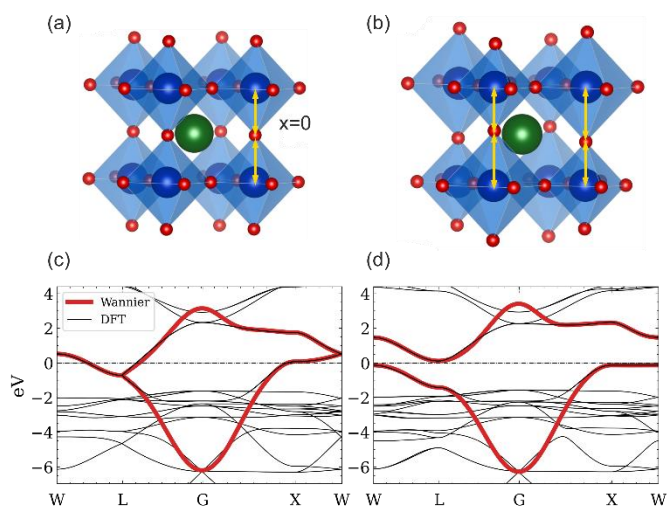


Рис. 1. Дышащая мода в ВаБиО₃ и ее влияние на электронную зонную структуру. Ионы Bi расположены в центрах октаэдров, O – в их вершинах, ион Ва находится в центре рисунка. Панели (a) и (b) схематически показывают неискаженную и искаженную структуру с большими и малыми октаэдрами, которые характеризуются различной длиной связи Bi-O. Стрелками показано изменение длины связи, x обозначает соответствующую амплитуду искажения. Большой октаэдр содержит дополнительную пару электронов, малый октаэдр – пару дырок. Панели (c) и (d) показывают электронную структуру неискаженной и искаженной решеток для $x = 0.1 \text{ \AA}$; тонкие линии соответствуют *ab initio* расчетам, жирные линии получены из эффективной модели сильной связи вблизи уровня Ферми. Прямая щель присутствует для любого ненулевого искажения, в то время как непрямая щель открывается при искажениях выше 0.1 \AA .

Список литературы

1. A.E. Lukyanov, I.A. Kovalev, V.D. Neverov et al. //Strength of the Hubbard potential and its modification by breathing distortion in ВаBiO₃ // Phys. Rev. B, 2022, Vol. 105, p. 045131.

А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, В.А. КАШУРНИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

УПОРЯДОЧЕННЫЕ ВИХРЕВЫЕ КОНФИГУРАЦИИ В ВТСП-ПЛЕНКЕ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ МАССИВОМ СУБМИКРОННЫХ МАГНИТНЫХ ТОЧЕК НА ПОВЕРХНОСТИ

В трехмерную модель слоистого высокотемпературного сверхпроводника введено описание взаимодействия вихревой нити с магнитной точкой, нанесенной на поверхность пленки. Учитывается ослабление поля магнитной точки вглубь сверхпроводника. Показаны пики на начальных участках кривых намагниченности, связанные с упорядоченными конфигурациями из 1, 3 и 4 вихрей на магнитной точке. Получены слабо немономонные зависимости критического тока от внешнего магнитного поля.

A.N. MAKSIMOVA¹, A.N. MOROZ¹, I.A. RUDNEV, S.V. POKROVSKII, V.A. KASHURNIKOV

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

ORDERED VORTEX CONFIGURATIONS IN A HTSC FILM WITH A RECTANGULAR ARRAY OF SUBMICRON MAGNETIC DOTS ON THE SURFACE

A description of the interaction of a vortex thread with a magnetic dot deposited on the surface of the film was introduced in the three-dimensional model of a layered high-temperature superconductor. The weakening of the magnetic field of the dot deep into the superconductor is taken into account. The peaks in the initial magnetization curves associated with ordered configurations of 1, 3 and 4 vortices at the magnetic point are shown. Weakly non monotonic dependences of the critical current on the external magnetic field are obtained.

В последнее время технологии создания микро- и наноструктур позволяют создавать в ВТСП-пленке искусственные центры пиннинга с размером, сравнимым с характерным размером вихря. Такими центрами пиннинга могут быть как различные конфигурации из нанесенного на поверхность сверхпроводника другого материала, так и отверстия – антиточки. Особое место среди таких структур занимают магнитные точки [1-3]. Ожидается, что эффективность пиннинга на магнитной точке может быть повышена за счет взаимодействия магнитного момента точки с полем вихря. В эксперименте размеры точек могут быть порядка нескольких сотен нм при характерном расстоянии между ними порядка 1 мкм. Численное исследование (как правило, решение уравнений Гинзбурга-Ландау) показывает возможность формирования правильных конфигураций из гигантского вихря под магнитной точкой и вихрей противоположного знака вокруг точки. Большое разнообразие различных параметров системы, необходимость получения наряду с вихревыми конфигурациями магнитных и транспортных характеристик сверхпроводника, сложность вихревой системы обуславливают необходимость применения численного расчета. Одним из методов, подходящих для решения данной задачи, является метод Монте-Карло [4].

В нашей работе расчеты выполнены в рамках трехмерной модели слоистого ВТСП. Для описания взаимодействия вихря с магнитной точкой была использована модификация выражения для энергии взаимодействия вихря и точечного диполя над сверхпроводящей пленкой [2], приближенно описывающая взаимодействие во всем пространстве, занимаемом пленкой.

Расчет трехмерной модели, даже при числе слоев ~ 10 , занимает достаточно продолжительное время. Поэтому в данной модели нами принято приближение, при котором стопка их 100 слоев вихрей-панкейков является единым объектом, к которому применяются подпроцессы алгоритма – рождение, уничтожение, движение. Для расчета был выбран прямоугольный массив магнитных точек. Размер образца в направлении входа вихрей составляет 5000 нм. Магнитный момент точек выбран $\sim 10^4 \mu_B$, на поверхности пленки располагалось от 15 до 60 магнитных точек. Исследовано влияние величины магнитного момента точек и анизотропии ВТСП. Как показали расчеты, эффекты подстройки вихревой решетки наиболее четко выражены при низкой анизотропии γ , поэтому расчеты кривых намагниченности и критического тока выполнены при $\gamma=10$, что соответствует ВТСП на основе иттрия.

На начальных участках кривых намагниченности различимы пики, наиболее выраженные пики получены для пленки с 60 точками. На мгновенных вихревых картинах, соответствующих основаниям пиков на кривых, видны закрепленные на магнитных точках структуры из 1, 3 и более вихрей.

Величина критического тока рассчитывалась из вольтамперной характеристики по критерию $1 \mu V/cm$. В исследованных диапазонах параметров системы показан рост критического тока с увеличением числа точек. Рассчитанные зависимости критического тока от внешнего магнитного поля являются немономонными: слабый рост имеет место до величины поля примерно 400 Гс.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № [20-08-00811](#).

Список литературы

1. M. Lange et al. // Physical review letters, 2003, Vol. 90, № 19, p. 197006.
2. M.V. Milošević, F.M. Peeters // Physical Review B, 2003, Vol. 68, № 2, p. 024509.
3. M.V. Milošević, S.V. Yampolskii, F.M. Peeters // Physical Review B, 2002, Vol. 66, № 17, p. 174519.
4. I.A. Rudnev, D.S. Odintsov, V.A. Kashurnikov, // Phys. Lett. A, 2008, Vol. 372, pp. 3934-3936.

А.Ю. МАЛЯВИНА, П.Ф. КАРЦЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СВЕРХБЫСТРАЯ КИНЕТИКА ЭКСИТОНОВ В МЕЛКОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЕ

В докладе представлено подробное численное исследование кинетики возбуждений в мелкой квантовой яме GaAs/AlGaAs при воздействии ультракоротким лазерным импульсом. Описана методика моделирования, приведены результаты расчетов, определены основные параметры процессов релаксации.

A. Y. MALYAVINA, P.F. KARTSEV

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

ULTRAFAST KINETICS OF EXCITONS IN SHALLOW QUANTUM WELL

We report the detailed numerical study of particle kinetics in a shallow quantum well GaAs/AlGaAs under excitation with ultrashort laser pulse. The simulation process is described in detail, the results of calculation and main parameters of relaxation processes are presented.

В докладе представлено исследование кинетики возбуждений в мелкой квантовой яме GaAs/AlGaAs. Интерес к задаче связан с ведущейся в настоящее время разработкой новых экситонных и поляритонных оптоэлектронных приборов, развиваются методы исследования при помощи техники «pump-probe». Ведутся эксперименты по оптическому контролю экситонной подсистемы [1], однако используемая теоретическая модель описывает эволюцию полных концентраций частиц, то есть уже после установления равновесия в подсистемах. Данная работа посвящена кинетике возбуждений с учётом импульсного распределения и позволяет изучать поведение возбуждений в образце на более ранних этапах процесса.

В работе используется кинетическое уравнение Больцмана [2] для чисел заполнения:

$$\frac{\partial n_{k,b}}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{p,q} V_c^2(\mathbf{q}) [n_{k+q,b} n_{p-q,b'} (1 - n_{k,b}) (1 - n_{p,b'}) - n_{k,b} n_{p,b'} (1 - n_{k+q,b}) (1 - n_{p-q,b'})] \delta(E_{k,b} + E_{p,b'} - E_{k+q,b} - E_{p-q,b'}),$$

где b, b' обозначают зоны участвующих носителей (проводимости и валентную).

Оператор кулоновского взаимодействия взят в виде

$$\hat{V}_c = \sum_{\substack{kpq \\ bb'}} V_c(\mathbf{q}, b, b') \hat{a}_{k,b}^+ \hat{a}_{p,b'}^+ \hat{a}_{p-q,b'} \hat{a}_{k+q,b}$$

и матричные элементы даются выражением

$$V_c(\mathbf{q}, b, b') = \int \Psi_b^*(z_1) \Psi_{b'}^*(z_2) \frac{e^2 \exp(i\mathbf{q}(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2))}{\varepsilon \varepsilon_0 \sqrt{(z_1 - z_2)^2 + (\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)^2}} \Psi_{b'}(z_2) \Psi_b(z_1) d^2 \boldsymbol{\rho}_1 d^2 \boldsymbol{\rho}_2 dz_1 dz_2,$$

где $\Psi_b(z)$ – волновая функция основного состояния квантовой ямы, ε – параметр диэлектрической проницаемости материала GaAs [3].

Для расчёта интегралов столкновений использован оригинальный метод на дискретной импульсной сетке [4,5]. Для расчёта матричных элементов применён метод Монте-Карло [6].

В докладе представлены результаты моделирования для ямы с параметрами из эксперимента [1] $x=0.03$, ширина 14 нм, проводится сравнение с приближенной моделью, определены характерные времена процессов релаксации по импульсам и термализации.

Список литературы

1. A. S. Kurdyubov et al. // Phys. Rev. B, 2021, Vol. 104, p. 035414.
2. V. V. Kabanov, A. S. Alexandrov // Phys. Rev. B, 2008, Vol. 78, p. 174514.
3. J. Singh // Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures, 2003.
4. I.O. Kuznetsov, P.F. Kartsev // E-print ar Xiv, 2020, Vol. 2011, p. 14173.
5. P.F. Kartsev // Proceedings of IWOCCL'2017, 2017, F127755.
6. M. P. Telenkov, Yu. A. Mityagin, P.F. Kartsev // Opt Quant Electron, 2014, Vol. 46 (6), p. 759.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АБЛИРОВАННЫХ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ

Слои аблированных центрифугированных наночастиц диоксида церия были нанесены на кремниевые подложки капельным путём и подвержены отжигу в диапазоне от 200 °С до 800 °С. В процессе отжига выполнены рентгено-фазовый анализ и спектрофотометрические исследования оптических свойств полученных образцов.

V.A. MAMONTOV, A.YU. RYZHENKOVA, M.A.PUGACHEVSKII

Southwest State University, Kursk, Russia

RESEARCH OF THE TEMPERATURE EFFECT ON THE PHASE COMPOSITION AND OPTICAL PROPERTIES OF ABLATED NANODISPERSE PARTICLES OF CERIUM DIOXIDE

Layers of ablated centrifuged cerium dioxide nanoparticles were applied dropwise onto silicon substrates and subjected to annealing in the range from 200 °C to 800 °C. X-ray phase analysis and spectrophotometric studies of the optical properties of the obtained samples were performed during the annealing process.

Наночастицы диоксида церия способны проявлять антиоксидантные свойства [1], например, аблированные наночастицы диоксида церия ингибируют гидроксильный радикал в процессе окислительной деградации органического вещества метиленового синего в реакции Фентона [2]. Антиоксидантные свойства обусловлены наличием поверхностных структурных дефектов, таких как кислородная вакансия, а их количество зависит от размеров частиц нанокристаллического диоксида церия [3].

Методом лазерной абляции были получены наночастицы диоксида церия. В дальнейшем частицы диспергировались в водной среде для получения нанодисперсного раствора, который подвергался центрифугированию на скоростях центрифуги от 800 до 13 400 об/мин. Затем капельным путём центрифугированные растворы наносились на кремниевые подложки. Далее проводились исследования фазового состава образцов.

Таблица. Размеры областей когерентного рассеяния аблированных наночастиц диоксида церия, центрифугированных при скоростях от 800 до 13400 об/мин в процессе отжига в диапазоне температур от 200 °С до 800 °С

	0 об/мин	800 об/мин	1000 об/мин	2000 об/мин	5000 об/мин	10000 об/мин	13400 об/мин
t, °С	<i>Размеры областей когерентного рассеяния наночастиц диоксида церия, d</i>						
25	47,7	40,5	50,1	31,8	33,7	31,5	27,5
200	47,1	44,4	49,1	37,1	32,6	29,6	32,4
200	49,8	45,2	54,6	41,2	38,0	33,6	27,6
25	47,5	42,3	48,9	36,3	36,6	29,5	32,1
400	57,4	44,1	51,6	42,3	31,8	31,5	32,4
400	48,1	44,7	50,0	40,4	33,8	32,6	31,0
25	48,8	43,2	44,8	35,8	37,6	29,8	29,0
600	48,0	47,1	50,5	36,1	33,8	28,9	33,0
600	46,7	42,9	50,8	38,8	36,3	40,6	36,6
25	46,5	40,2	51,5	38,5	35,9	31,9	15,0
800	48,4	46,5	58,4	39,7	38,6	31,5	32,6
800	50,6	46,0	58,0	43,7	37,3	35,6	34,5
25	56,7	41,2	51,3	39,4	41,7	32,4	34,5

В таблице продемонстрированы значения размеров областей когерентного рассеивания при $2\theta=27-30$. Из результатов видно, что размеры областей когерентного рассеивания увеличиваются при увеличении температуры отжига. Также были выполнены спектрофотометрические исследования оптических свойств наночастиц диоксида церия.

Список литературы

1. P. P. Tumkurand etc. // Nanomanufacturing, 2021, Vol. 1(3), pp. 176-189.
2. M.A. Pugachevskii, A.N. Chibisov, V.A. Mamontov, A.P. Kuz'menko // Phys. Status Solidi, 2021, p. 2100355.
3. M.A. Pugachevskii, V.A. Mamontov and etc. // Technical Phys. Letters, 2020, Vol. 46, №. 20, pp. 38-41.

И.В. МАРТИРОСЯН¹, С.В. ПОКРОВСКИЙ¹, М.С. НОВИКОВ², И.А. РУДНЕВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия,

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ И ПОТЕРЬ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ CORC-КАБЕЛЕ

Разработана комплексная расчетная модель ВТСП CORC-кабеля на основе А-Т-формализма. Проведен расчет распределения токов и потерь в системе при работе кабеля в режиме переменного и постоянного транспортного тока, а также при воздействии на систему синхронного магнитного поля. Для отдельных образцов была проведена экспериментальная верификация. Хорошее согласие экспериментальных данных и результатов моделирования свидетельствует о работоспособности численной модели и её применимости для широкого спектра электротехнических применений.

I.V. MARTIROSYAN¹, S.V. POKROVSKI¹, M.S. NOVIKOV², I.A. RUDNEV¹

¹National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

CURRENTS DISTRIBUTION AND LOSSES SIMULATION IN THE SUPERCONDUCTING CORC CABLE

A complex computational model of an HTS CORC cable based on the A-T formulation has been developed. The currents and losses distributions in the system was calculated when the cable was operated in the mode of alternating and direct transport current, as well as when the system was exposed to a synchronous magnetic field. For individual samples, experimental verification was carried out. Good agreement between the experimental data and simulation results indicates the operability of the numerical model and its applicability for a wide range of electrical applications.

Электрические свойства высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) привлекают интерес с точки зрения различных приложений, таких как электрические машины [1-3]; токоограничители [4]; мощные электромагниты [5]; системы хранения [6] и передачи [7] электроэнергии. Для конструирования таких устройств необходимо проведение анализа электромагнитных свойств сверхпроводящих лент и кабелей, позволяющий оценить их рабочие характеристики при различных условиях эксплуатации. Более того, потери в сверхпроводящем кабеле должны рассчитываться с учетом конфигурации конкретной системы охлаждения. Первые FEM (finite element model) модели сверхпроводящих CORC(Conductoron Round Core Cable)кабелей были основаны на *H*-формализме [8], что предполагает использование в качестве зависимой переменной модели компоненты напряженности магнитного поля. Очевидным недостатком подхода является высокое потребление вычислительных ресурсов и времени. Новая трехмерная модель CORC-кабеля была разработана на основе *A-T* формализма. В этом случае прямой решатель использует две переменные состояния: токовый векторный потенциал *T* (ТВП) и магнитный векторный потенциал *A* (МВП). ТВП применяется к сверхпроводящим областям для решения задачи о распределении плотности тока *J* в сверхпроводнике, прочие домены рассчитываются в терминах МВП. С использованием мультифизической модели выполнен расчет распределения токов и потерь в системе, проведена оптимизация конструкции многослойного CORC-кабеля при работе в режимах постоянного и переменного электрического тока, а также при воздействии на систему синхронного магнитного поля. Было установлено, что при синхронном вводе транспортного тока и магнитного поля имеет место быть задержка возникновения напряжения на образце и, как следствие, задержка возникновения потерь, при этом в зависимости от величины и направления магнитного поля может наблюдаться асимметричный нагрев отдельных участков ВТСП лент. Для отдельных образцов была проведена экспериментальная верификация. Хорошее согласие экспериментальных данных и результатов моделирования свидетельствует о работоспособности численной модели и её применимости для широкого спектра электротехнических применений.

Список литературы

1. G. Snitchler, B. Gamble, C. King, P. Winn // Transactions on Applied Superconductivity, 2011, Vol. 21, № 3, pp. 1089-1092.
2. B. Dolisy, S. Mezani, T. Lubin, J. Leveque // Superconductor Science and Technology, 2017, Vol. 30, № 3, p. 035015.
3. J. Fraunhofer, J. Grundmann, G. Klaus, W. Nick // Journal of Physics: Conference Series, 2008, Vol. 97, p. 012189.
4. I.K. Okakwu, P.E. Orukpe, E.A. Ogujor // European Journal of Engineering Research and Science, 2018, Vol. 3, № 7, pp. 28–32.
5. E. Berrospe-Juarez, V.M.R. Zermeno, F. Trillaud, A. Gavrilin, F. Grilli, D.V. Abramov, D.K. Hilton, H.W. Weijers // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, Vol. 28, № 3, p. 4602005.
6. C.C. Rong, P. N. Barnes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 279, p. 012013.
7. W.H. Fietz, M.J. Wolf, A. Preuss, R. Heller, K.-P. Weiss // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, Vol. 26, № 4, p. 4800705.
8. B. Shen, F. Grilli, T. Coombs // Supercond. Sci. Technol., 2020, Vol. 33, № 3, p. 033002.

И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, С.А. КРАТ, И.А. РУДНЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА

Разработана численная модель для расчета и оптимизации тороидального магнитного поля токамака, состоящего из двенадцати секций, представляющих собой катушки из ВТСП провода. В качестве параметров токамака при моделировании использованы характеристики малого сферического токамака НИЯУ МИФИ. Проведен расчет распределения поля в системе, установлена величина транспортного тока, необходимого для достижения требуемого магнитного поля в импульсном режиме работы. Выполнен расчет потерь в CORC-кабеле, проведена оптимизация параметров охлаждения системы.

I.V. MARTIROSYAN, S.V. POKROVSKII, S.A. KRAT, I.A. RUDNEV
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

CALCULATION AND OPTIMIZATION OF THE SUPERCONDUCTING SYSTEM OF THE TOKAMAK TOROIDAL MAGNETIC FIELD

A numerical model has been developed for calculating and optimizing the toroidal magnetic field of a tokamak, consists of twelve sections, which are coils of HTS wire. The characteristics of a small spherical tokamak of the National Research Nuclear University MEPHI were used as parameters of the tokamak in the simulation. The field distribution in the system was calculated, and the value of the transport current required to achieve the magnetic field of 2T in the operation pulsed mode was established. Losses calculation in CORC-cable was performed; optimization of system cooling parameters was carried out.

В настоящий момент известно, что применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в области управляемого термоядерного синтеза позволяет значительно увеличить тороидальное магнитное поле в установках и является практически безальтернативным методом для достижения магнитных полей при потребляемой мощности более низкой, чем для аналогичной системы на основе медных проводников [1]. Данная работа посвящена моделированию тороидальной магнитной системы токамака, состоящей из двенадцати секция, представляющих собой D-образные ВТСП катушки из CORC-кабеля. В качестве параметров токамака при моделировании использованы характеристики малого сферического токамака НИЯУ МИФИ. Перспективой развития конструкции действующей установки является создание магнитной системы, обеспечивающей получение постоянного тороидального поля, равного 2 Тл. В связи с этим в качестве требуемого выходного параметра модели D-образных катушек на основе сверхпроводящего CORC-кабеля была заложена именно эта величина. Моделирование выполнено методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Проведен расчет распределения поля в системе, установлена величина транспортного тока, необходимого для достижения требуемого магнитного поля в импульсном режиме работы. Было установлено, что магнитное поле на краях обмотки превышает магнитное поле на оси тора в несколько раз, что означает подавление критического тока сверхпроводника при работе. На основе А-Тформализма в термодинамической связке проведен расчет потерь сверхпроводящего CORC-кабеля, функционирующего в соответствующем магнитном поле. Проведена оптимизация как самой магнитной системы (увеличение количества витков в одной секции, изменение числа слоёв и рядов CORC-кабеля, угла намотки ВТСП лент и др.), так и оптимизация режимов охлаждения и нагрузки. Показаны характерные времена работоспособности системы для достижения требуемых параметров тороидального магнитного поля в различных режимах охлаждения при импульсной токовой нагрузке.

Список литературы

1. T.S. Lee et al. // Optimal design of a toroidal field magnet system and cost of electricity implications for a tokamak using high temperature superconductors // Fusion Engineering and Design, 2015, Vol. 88-89, pp. 1072-1075.

М.М. МАРТЪЯНОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВИХРЕВАЯ РЕШЕТКА СЛОИСТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Методом Монте-Карло в рамках двумерной модели слоистого ВТСП выполнено моделирование вихревой решетки в присутствии теплового пятна. Получены картины вихревой плотности во внешнем магнитном поле. Исследована релаксация вихревой решетки при снятии теплового пятна. В численном расчете воспроизведена возможность манипулирования отдельными вихрями с помощью градиента температуры.

M.M. MARTIANOV, A.N. MAKSIMOVA, A.N. MOROZ
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

VORTEXLATTICE IN LAYERED HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR UNDER TEMPERATURE GRADIENT

The Monte Carlo method in the framework of a two-dimensional model of layered HTSC is used to simulate a vortex lattice in the presence of a "hot spot". Patterns of vortex density in an external magnetic field are obtained. Relaxation of a vortex lattice during removal of a hot spot is investigated. The numerical calculation reproduces the possibility of manipulating individual vortices with a temperature gradient.

Метод Монте-Карло в последние несколько десятков лет успешно применялся для исследования вихревой решетки в сверхпроводниках второго рода [1,2]. Однако, для исследования вихревой решетки в присутствии градиента температуры данный метод еще не применялся. В то же время, локальные области с повышенной температурой в сверхпроводнике могут образоваться, например, при попадании в сверхпроводящую пленку заряженной частицы; явления, возникающие при этом, используются при создании детекторов [3,4]. Локальный нагрев возникает при скачках магнитного потока. Также в литературе описаны эксперименты, при которых манипуляция отдельными вихрями осуществлялась через нагрев лазером отдельных малых областей [5].

В нашей работе в модель слоистого ВТСП введено описание температурного пятна. Неоднородность температуры вводилась в расчет через зависимость от T длины когерентности и глубины проникновения магнитного поля и через вероятности реализации подпроцессов. Для расчёта были выбраны параметры, соответствующие параметрам слоистого ВТСП $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$: $\delta = 2,7\text{\AA}$ – толщина сверхпроводящего слоя, $\lambda(T = 0) = 1800\text{\AA}$ – глубина проникновения внешнего магнитного поля в сверхпроводник, $T_c = 84\text{K}$ – критическая температура, $\xi = 20\text{\AA}$ – длина когерентности. Максимальная амплитуда внешнего поля при перемагничивании составила 1100 Гс. Исследовано влияние величины магнитного поля и разности температуры в центре и по краям пятна.

Результаты расчетов показывают, что вихревая плотность ниже в центре пятна, где $T \sim 10\text{K}$. Также вихри в центре расположены менее упорядоченно, что соответствует более интенсивным тепловым колебаниям вихрей вблизи положения равновесия. Видно, что на картине, усредненной по шагам Монте-Карло вихревой плотности, не наблюдается движения вихрей. Это связано с введенными в расчете граничными условиями и требует дальнейших исследований. Исследование релаксации вихревой решетки при снятии теплового пятна показало, что перераспределение вихрей происходит практически мгновенно (снятие теплового пятна происходит также мгновенно, т.е. теплопроводность предполагаем бесконечной). Данные результаты получены для сверхпроводника, не содержащего центры пиннинга. Влияние дефектов на релаксацию вихрей после снятия теплового пятна является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках проекта №20-21-00085.

Список литературы

1. I.A. Rudnev, D.S. Odintsov, V.A. Kashurnikov // *Phys. Lett. A*, 2008, Vol. 372, pp.3934-3936.
2. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova, I.A. Rudnev // *Physics of the Solid State*, 2014, Vol. 56(5), pp. 894-911.
3. F. Najafi et al. // *Nature communications*, 2015, Vol. 6, № 1, pp. 1-8.
4. T. Polakovic et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, Vol. 959, p. 163543.
5. I.S. Veshchunov et al. // *Optical manipulation of single flux quanta* // *Nature communications*, 2016, Vol. 7, № 1, pp. 1-7.

Б.И. МАССАЛИМОВ¹, О.А. СОБОЛЕВСКИЙ¹, А.В. САДАКОВ¹, П.Н. ДЕГТЯРЕНКО²

¹Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

²ООО «С-Инновации», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННОГО 2GHTS-ПРОВОДА С РАЗЛИЧНОЙ СТЕХИОМЕТРИЕЙ СОСТАВА НА ОСНОВЕ Gd В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Данная работа посвящена исследованию ВТСП проводов GdBCO с измененной стехиометрией (+0%Gd, +15%Gd, +30%Gd), выращенных методом импульсного лазерного осаждения (PLD). Критическая плотность тока, определенная из вольтамперных характеристик (VCC), была измерена четырехзондовым методом с измерительным током до 100 мА в диапазоне поля от 0 до 9 Тл и при температурах 65 и 77 К.

B.I. MASSALIMOV¹, O.A. SOBOLEVSKY¹, A.V. SADAKOV¹, P.N. DEGTYARENKO²

¹Ginzburg Center for High-Temperature Superconductivity and Quantum Materials, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS), Moscow, Russia

²LLC S-Innovations, Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE CRITICAL CURRENT OF AN INDUSTRIAL 2GHTS-WIRE WITH A DIFFERENT COMPOSITION STOICHIOMETRY BASED ON Gd IN STRONG MAGNETIC FIELDS

This work is devoted to systematically investigation of 2G HTS wires with controlled of gadolinium stoichiometry. All wires were grown by pulsed laser deposition (PLD) and characterized by transport over wide temperature (T) and magnetic field (H) ranges with different orientation. The samples using commercial production equipment at LLC S-Innovations and contained different concentration of Gd : +0%Gd, +15%Gd and +30%Gd [1]. The critical current density, determined from the current-voltage characteristics (VCC), was measured by a four-probe method with a measuring current of up to 100 mA in the field range from 0 to 9 T and at temperatures of 65 and 77 K.

Данная работа посвящена систематическому исследованию ВТСП проводов 2го поколения на основе GdBCO [1] с различной стехиометрией гадолиния. Все провода были выращены методом импульсного лазерного осаждения (PLD) и характеризовались транспортными измерениями в широком диапазоне температур и магнитных полей. Образцы изготовлены на коммерческом производственном оборудовании ООО «С-Инновации» и содержали различную концентрацию гадолиния +0%Gd, +15%Gd, +30%Gd. Исследуемый образец шириной 12 мм ленты модифицировался с помощью лазерной резки и фокусированного ионного пучка (FIB) для образования микромостика размерами порядка 5 мкм на 150 мкм. Критические плотности тока измерялись с помощью вольтамперных характеристик (ВАХ) используя четырех-контактный метод в полях от 0 до 9Т при температурах 65К и 77К.

Полученные результаты исследований будут использованы при проектировании различного рода сверхпроводящего исследовательского и промышленного оборудования в разных областях энергетики, медицины и науки.

Список литературы

1. A. Markelov et al. // 2G HTS wire with enhanced engineering current density attained through the deposition of HTS layer with increased thickness // Progress in Superconductivity and Cryogenics, 2019, Vol. 21, № 4, pp. 29-33.

А.В. МАТАСОВ¹, А.А. БУШ², В.И. КОЗЛОВ², В.А. АНДРИАНОВ³

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия

³НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

СИНТЕЗ, ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МЕССБАУЭРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗЫ CuCrO_2 СО СТРУКТУРОЙ ДЕЛАФОССИТА

На синтезированных методом твердофазных реакций керамических образцах фазы CuCrO_2 со структурой делафоссита выполнены термогравиметрические, рентгенодифракционные, мессбауэровские, диэлектрические и электрические исследования. Обнаружен эффект порогового по электрическому полю переключения изучаемых образцов из высокоомного в низкоомное состояние, происходящий в области температур 170 – 200 К при приложении к образцам смещающего электрического поля с напряженностью >1 кВ/см.

A.V. MATASOV¹, A.A. BUSH², V.I. KOZLOV², V.F. ANDRIANOV³

¹National Research University «MPEI», Moscow, Russia

²MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia

³Skobel'syn Research Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

SYNTHESIS, THERMOGRAVIMETRIC, DIELECTRIC, ELECTRICAL AND MOSSBAUER STUDIES OF THE CuCrO_2 PHASE WITH DELAFOSSTE STRUCTURE

Thermogravimetric, X-ray diffraction, Mossbauer, dielectric and electrical studies were performed on the ceramic samples of the CuCrO_2 phase with the delafossite structure synthesized by the method of solid-phase reactions. The effect of electric field threshold switching of the studied samples from a high-resistance to a low-resistance state, occurring in the temperature range of 170-200 K when a biasing electric field with strength $E > 1$ kV/cm was applied to the samples, was detected.

Выполнен термогравиметрический анализ процесса образования фазы CuCrO_2 со структурой делафоссита в процессе нагрева гомогенизированной смеси оксидов $\text{Cu}_2\text{O} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, а также синтезированной керамики этой фазы. Получены данные о температурной области и кинетике образования фазы CuCrO_2 , об изменении валентного состоянии меди в процессе синтеза, о летучести компонент из керамики. На синтезированных керамических образцах CuCrO_2 и проведены рентгенографические исследования, изучены температурные зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon(T)$ и потерь $\text{tg}\delta(T)$, электрического сопротивления $\rho_{AC}(T)$ в области температур 80-300 К и диапазоне частот 25Гц–1МГц, изучены также температурные зависимости электрического сопротивления на постоянном токе (DC) с приложением к образцу смещающего электрического поля напряженностью $E = 10$ -2700 В/см. На синтезированных образцах $\text{Cu}(\text{Cr}_{0.96}^{57}\text{Fe}_{0.04})\text{O}_2$ изучены мессбауэровские спектры в области 80-300 К. Выполненный рентгеновский фазовый анализ показал однофазность полученных образцов и принадлежность полученной фазы к структурному семейству делафоссита, определенные параметры гексагональной элементарной ячейки, синтезированной нами фазы CuCrO_2 равны $a = 2.9742(2)$, $c = 17.1085(20)$ Å. В изученной области температур на температурных зависимостях диэлектрических, проводящих и мессбауэровских характеристик не наблюдается особенностей, характерных для фазовых переходов. На зависимостях $\epsilon(T)$ и $\text{tg}\delta(T)$ в области температур 150-250 К наблюдаются максимумы релаксационного характера с энергией активации релаксационного процесса равной 0.22 эВ. Зависимость $\rho_{DC}(T)$ CuCrO_2 имеет характерный для полупроводников вид с понижением сопротивления при повышении температуры. Полученные температурные зависимости сопротивления, измеренные при низких смещающих напряжениях U_0 , ($< \sim 1$ кВ/см) области высоких температур $\sim 170 - 600$ К описываются формулой Аррениуса $\rho_0 \exp(E_a/kT)$, характеризующей активационную проводимость, где E_a – энергия активации, k – постоянная Больцмана. Найденная при фиттировании зависимости $\rho_{DC}(T)$ формулой Аррениуса энергия активации составляет $E_a = 0,35$ эВ. В области температур $T < \sim 170$ К зависимость $\rho_{DC}(T)$ аппроксимируется формулой Мотта $\epsilon(T) = \rho_0 \exp[(T_0/T)^{1/4}]$ с $T_0 = 5.2 \cdot 10^9$ К, что указывает на переход при низких температурах к прыжковому механизму переноса зарядов с переменной длиной прыжка. На зависимостях $\rho_{DC}(T, E)$, измеренных при приложении к образцу смещающего электрического поля E , при $E > 1.0$ кВ/см в области 170-200 К проявляются скачкообразные изменения, указывающие на происходящий в образцах пороговый по электрическому полю переход из высокоомного в низкоомное состояние. Дана интерпретация обнаруженного эффекта переключения образцов CuCrO_2 , в основе, которой лежит индуцированный электрическим полем переход носителей заряда из связанного полярного состояния с низкой подвижностью в квазисвободное неполярное состояние с резким увеличением подвижности.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ: проект № FSFZ-0706-2020-0022 с использованием оборудования ЦКП МИРЭА – Российского технологического университета.

У.К. МАХМАНОВ¹, Ш. ЭСАНОВ¹, Б. АСЛОНОВ¹, О. ДИЁРОВ², О. СИДИГАЛИЕВ², У. ТУРДАЛИЕВ³

¹Институционно-плазменных лазерных технологий имени У.А. Арифова, АН РУз, Ташкент, Узбекистан

²Национальный Университет Узбекистана имени М. Улугбека, Ташкент, Узбекистан

³Наманганский государственный университет, Наманган, Узбекистан

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В РАСТВОРАХ ФУЛЛЕРЕНА C₆₀ МЕТОДОМ РЕФРАКТОМЕТРИИ

Методом современной рефрактометрии исследовано поведение межмолекулярных взаимодействий фуллерена C₆₀ в бинарных растворителях гексан/ксилол при различных концентрациях компонентов.

U.K. MAKHMANOV¹, Sh. ESANOV¹, B. ASLONOV¹, O. DIYOROV², O. SIDIGALIEV², U. TURDALIEV³

¹Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov, Uzbekistan Academy Sciences, Tashkent, Uzbekistan

²National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan

³Namangan State University, Namangan, Uzbekistan

STUDY OF INTERMOLECULAR INTERACTIONS IN SOLUTIONS OF C₆₀ FULLERENE BY REFRACTOMETRY

The behavior of intermolecular interactions of C₆₀ fullerene in hexane/xylene binary solvents at various component concentrations was studied by modern refractometry.

Наноразмерная аллотропная форма углерода, молекула фуллерена (C₆₀), привлекает внимание ученых, прежде всего своими уникальными электронными, механическими, оптическими, термическими и химическими свойствами [1]. Эти свойства позволяют использовать наноматериалы на основе фуллеренов в различных областях науки и техники, включая современную медицину, фармакологию, солнечную энергетику, нано- и микроэлектронику, материаловедение.

Существуют различные методы синтеза различных наноструктур (нанокластеров, нанопленок, нанослой) на основе фуллеренов [2]. Можно управлять морфологией и размером наноструктур, образующихся в результате самосборки молекул фуллерена C₆₀ в растворах, что во многом зависит от типа используемых органических растворителей, количества компонентов растворителя и концентрации компонентов в растворе [3].

Целью данной работы является экспериментальное исследование изменения показателя преломления растворов фуллерена C₆₀ (чистота ≥99.8 %, SES Research, США) в бинарных растворителях «гексан + ксилол» при различных концентрациях компонентов.

В экспериментах использовались следующие органические растворители от производителя SigmaAldrich (США): гексан (C₆H₁₄) и ксилол (C₈H₁₀). Показатель преломления (n) исследуемых растворов фуллерена C₆₀ измеряли с помощью цифрового рефрактометра марки PAL-VX/RI (Atago, Япония). Точность измерения рефрактометра составляет ~0.0001. В таблице приведены экспериментально измеренные значения показателей преломления растворов гексан/ксилол и C₆₀/гексан/ксилол при двух различных концентрациях фуллерена C₆₀ (~0,018 и ~0,027 г/л).

Молярная доля ксилола в растворах (моль)	Значения n растворов		
	Гексан/ксилол	C ₆₀ /гексан/ксилол C ₆₀ ~0.018 г/л	C ₆₀ /гексан/ксилол C ₆₀ ~0.027 г/л
1	1.4985	1.4986	1.5048
0.908487167	1.4879	1.4880	1.4935
0.815231937	1.4802	1.4804	1.4836
0.720184068	1.4715	1.4716	1.4762
0.623291371	1.4582	1.4585	1.4623
0.524499607	1.4474	1.4481	1.4527
0.423752392	1.4324	1.4326	1.4344
0.320991088	1.4144	1.4146	1.4162
0.216154689	1.4019	1.4021	1.4034
0.109179697	1.3908	1.3915	1.3955
0	1.3742	1.3748	1.3762

Видно, что значения n увеличиваются с увеличением концентрации, как растворителя (ксилола), так и фуллерена C₆₀ в растворах. При концентрации C₆₀~0,027 г/л в системе C₆₀/гексан/ксилол избыточные значения n больше, чем в растворе с концентрациями C₆₀~0,018 г/л. Последнее можно объяснить усилением межмолекулярных взаимодействий («C₆₀-C₆₀» и «C₆₀-растворитель») в растворах с увеличением C₆₀.

Список литературы

1. R.E. Smalley // Sciences, 1991, Vol. 31, p. 22.
2. U.K. Makhmanov, A.M. Kokhkharov, S.A. Bakhramov, S.A. Esanov// Romanian J. Phys., 2022, Vol. 67, No. 1-2, p. 601.
3. U.K. Makhmanov, A.M. Kokhkharov, S.A. Bakhramov // Fuller. Nanotub //Carbon Nanostructures, 2019, Vol.27, p. 273.

У.К. МАХМАНОВ¹, Ш.А. ЭСАНОВ¹, О.У. ДИЁРОВ², О. СИДИГАЛИЕВ², У. ТУРДАЛИЕВ³
¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова, АН РУз., Ташкент, Узбекистан
²Национальный Университет Узбекистана имени М. Улугбека, Ташкент, Узбекистан
³Наманганский государственный университет, Наманган, Узбекистан

СИНТЕЗ НАНОТРУБОК ФУЛЛЕРЕНА C₇₀ В ОБЪЕМЕ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ КАПЛИ

Впервые осуществлен синтез многослойных нанотрубок фуллерена C₇₀ в объеме испарения изолированной капли раствора C₇₀, расположенной на гладкой поверхности подложки. Установлены структурные и размерные характеристики нанотрубок C₇₀.

U.K. MAKHMANOV¹, SH.A. ESANOV¹, O.U. DIYOROV², O. SIDIGALIEV², U. TURDALIEV³
¹Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov, Uzbekistan Academy Sciences, Tashkent, Uzbekistan
²National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan
³Namangan State University, Namangan, Uzbekistan

SYNTHESIS OF C₇₀ FULLERENE NANOTUBES IN THE VOLUME OF AN EVAPORATING DROP

For the first time, multilayer C₇₀ fullerene nanotubes were synthesized in the evaporation volume of an isolated drop of C₇₀ solution located on a smooth substrate surface. Structural and dimensional characteristics of the obtained C₇₀ nanotubes have been established.

Синтез наноструктурированных материалов является ключевым вопросом для решения важнейших проблем современной наноинженерии. Управление наноразмерными структурами открывает широкие возможности как в синтезе наноразмерных материалов, так и в улучшении функций синтезируемых материалов.

В настоящее время наблюдается большой интерес к нанотрубкам фуллерена (C₆₀, C₇₀), в связи с их практическим применением в синтезе быстрореагирующих оптических устройств, наносенсоров, биочипов и высокопрочных наноструктурированных полупроводниковых чувствительных элементов [1–2]. Процессы синтеза различных нанокластеров и одномерных наноструктурированных материалов на основе молекул фуллерена C₇₀ будут привлекать особое внимание широкого круга исследователей.

Целью данной работы является экспериментальный синтез нанотрубок фуллерена C₇₀. Будут обсуждены конкретные физические механизмы синтеза нанотрубок. В качестве органических растворителей кристаллического фуллерена C₇₀ (чистота ≥99.7 %, SES Research, США) в экспериментах нами были использованы этилбензол (C₈H₁₀) и изопропиловый спирт (C₃H₈O) от поставщика «Sigma Aldrich» (США).

Предварительные исследования методами оптической и электронной микроскопии показали, что внутри рабочего раствора формируются нанокластеры из молекул C₇₀. На рис. 1 представлено СЭМ-изображение многослойной нанотрубки C₇₀, синтезированной в объеме испаряющейся капли дисперсного раствора C₇₀ в смеси растворителей «этилбензол+изопропиловый спирт» (с объемной долей 0.9:0.1, соответственно) на поверхности кремниевой подложки. При этом многослойные нанотрубки C₇₀ содержат как отдельные молекулы C₇₀, так и нанокластеры C₇₀. Видно, что внешний и внутренний диаметр нанотрубки составляют ~520 нм и ~310 нм, соответственно. Длина синтезированной нанотрубки составляла ~900 нм.

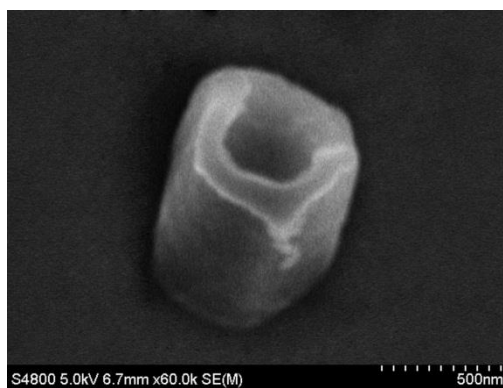


Рис. 1. СЭМ-снимок нанотрубки фуллерена C₇₀, синтезированной в объеме испаряющейся капли раствора фуллерена на поверхности кремниевой подложки.

Следует отметить, что закрытость одного конца синтезированных нами нанотрубок позволяет использовать их на практике в качестве нанокпилляров, наносорбентов и наноконтейнеров. Метод, использованный при синтезе нанотрубок C₇₀, эффективен, экономичен и намного проще в реализации. Кроме того, наличие технологии управления и контроля геометрических размеров синтезируемых нанотрубок увеличивает возможности используемого метода.

Список литературы

1. H. Yin, H. Lin; Y. Zong, X.-D. Wang // Org. Electron, 2021, Vol. 93, p. 106142.
2. U.K. Makhmanov, A.M. Kokhkharov, S.A. Bakhramov, S.A. Esanov // Romanian J. Phys., 2022, Vol. 67, № 1-2, p. 601.

А.А. МИХАЙЛОВ¹, А.Н. МАКСИМОВА¹, А.Н. МОРОЗ¹, Д.М. ГОХФЕЛЬД^{2,3}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ТЕМПЕРАТУРНАЯ И РАЗМЕРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛЯ НЕОБРАТИМОСТИ СЛОИСТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

Методом Монте-Карло в рамках двумерной модели слоистого ВТСП выполнены расчеты кривых намагниченности при различном размере образца. Изменение размера образца соответствует различному размеру гранул в гранулированном ВТСП. Получены убывающие зависимости поля необратимости от температуры при фиксированном размере и возрастающие зависимости поля необратимости от ширины образца.

A.A. MIKHAILOV¹, A.N. MAKSIMOVA¹, A.N. MOROZ¹, D.M. GOKHFELD^{2,3}

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

²Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

TEMPERATURE AND DIMENSIONAL DEPENDENCE OF THE IRREVERSIBILITY LINE IN HIGH- TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR

Calculations of Magnetization curves for different sample sizes were performed within the framework of a two-dimensional model of layered HTSC by using the Monte Carlo method. The change in the sample size corresponds to the different size of the granules in the polycrystalline HTSC. Decreasing dependences of the irreversibility field on temperature at a fixed size and increasing dependences of the irreversibility field on the width of the sample are obtained.

Сверхпроводники второго рода обладают высоким значением критического тока, т.е. транспортного тока, при котором начинается срыв вихрей с дефектов и их движение под действием силы Лоренца. Величина критического тока в значительной мере определяется дефектной структурой образца и, как следствие, эффективностью закрепления вихрей на центрах пиннинга. Согласно модели Бина, величина критического тока пропорциональна ширине петли перемагничивания [1]. Важное для практики значение имеет зависимость величины критического тока от внешнего магнитного поля, причем, как правило, величина критического тока с увеличением поля уменьшается [2]. Поле необратимости является важной для практики величиной, поскольку определяет магнитное поле, при котором ширина петли и, как следствие, критический ток, обращается в 0. В [3,4] исследованы зависимости поля необратимости от температуры, допирования и примесей.

В [5] исследовано перемагничивание гранулированного сверхпроводника на основе железа, экспериментально получены петли перемагничивания образцов, состоящих из гранул различного размера. (от сотен нм до нескольких мкм). Экспериментальные исследования процессов перемагничивания связаны с рядом технологических трудностей, таких как синтез, измельчение для получения гранул нужного размера. Также не всегда достоверно известны структура и характер центров пиннинга в образце. Поэтому численные методы в применении к данной задаче приобретают важное значение. Численный расчет позволяет менять температуру, характер и концентрацию дефектов в широких диапазонах и анализировать влияние различных факторов.

В ходе нашей работы методом Монте-Карло для вихревой решетки в слоистом ВТСП [6] были рассчитаны кривые намагниченности при различной ширине образца (размер в направлении входа вихрей в сверхпроводник через границу). Ширина пластины менялась от 0.9 до 7 мкм. Выбранные размеры образца совпадают по порядку величины с характерным размером гранул в гранулированных ВТСП. Расчеты выполнены при фиксированной концентрации центров пиннинга. Показано, что поле необратимости убывает с повышением температуры. С увеличением ширины сверхпроводника поле необратимости H_{irr} , напротив, показывает заметный рост. Данный эффект качественно согласуется с результатами экспериментов. Построенные в логарифмическом масштабе по обеим осям зависимости H_{irr} от ширины d при $d > 1,5$ мкм являются приближенно прямолинейными, что указывает на степенной характер данной зависимости. По крайней мере, для исследованных параметров показатель степени растет с повышением температуры. Метод расчета может быть использован в предсказательных целях для тех параметров сверхпроводника, при которых эксперименты еще не проводились.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках проекта №20-21-00085.

Список литературы

1. C. P. Bean //Physical review letters, 1962, Vol. 8, № 6, p. 250.
2. V. Selvamanickam et al. //Applied Physics Letters, 2015, Vol. 106, № 3, p. 032601.
3. L. D. L. S. Valladares et al. //Physics Procedia, 2012, Vol. 36, pp. 354-359.
4. D. Ahmad et al. //Current Applied Physics, 2010, Vol. 10, № 5, pp. 1345-1348.
5. F.E. Sánchez-Zacate, A. Conde-Gallardo //Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2021, Vol. 34, № 12, pp. 3141-3149.
6. I.A. Rudnev, D.S. Odintsov, V.A. Kashurnikov // Phys. Lett. A, 2008, Vol. 372, pp. 3934-3936.

Т.М. МУКАМЕТКАЛИ, С.К. ТАЖИБАЕВ, Д.С. КАМБАР, А.К.ЗЕЙНИДЕНОВ

Карагандинский университет им. академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК TiO₂

В статье оказаны спектры люминесценции пленок TiO₂ с различной толщиной. Фотовозбуждение люминесценции пленок TiO₂ осуществлялось в полосе поглощения на длине волны равной $\lambda = 350$ нм.

T.M. MUKAMETKALI, S.K. TAZHIBAEV, D.S. KAMBAR, A.K. ZEINIDENOV

Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES OF TiO₂ FILMS

The article shows the luminescence spectra of TiO₂ films with different thicknesses. Photo excitation of the luminescence of TiO₂ films was carried out in the absorption band at a wavelength equal to $\lambda = 350$ nm.

Основной уровень дефектов в пленках TiO₂ находится в коротковолновой области $\lambda = 474$ и 514 нм и красной области $\lambda = 788$ и 848 нм. Уменьшение толщины подложки приводит к значительному изменению пиковой интенсивности. Пик излучения в диапазоне от 2,61 до 2,41 эВ в видимом диапазоне, и от 1,58 до 1,47 эВ на инфракрасный диапазон для всех образцов. Наибольшая интенсивность пика излучения образец с толщиной 120 нм находится в фиолетовой полосе в диапазоне от 2,61 до 2,41 эВ. Наиболее интересным является то, что результаты PL показывают два пиковых уровня в фиолетовой полосе, которая находится вблизи и ниже объемного анатаза TiO₂ с энергией 2,61 эВ и 2,41 эВ для 120, 90, 60, 40 нм при отжиге в температуре 500 °С. Охта и другие, изучив спектры PL в видимой области объемного анатаза, они отнесли его к излучательной рекомбинации STE [1]. STE - это состояние, при котором экситон теряет способность перемещаться по кристаллической решетке, в то время как экситон притягивается электрон-дыркой электростатической кулоновской силой.

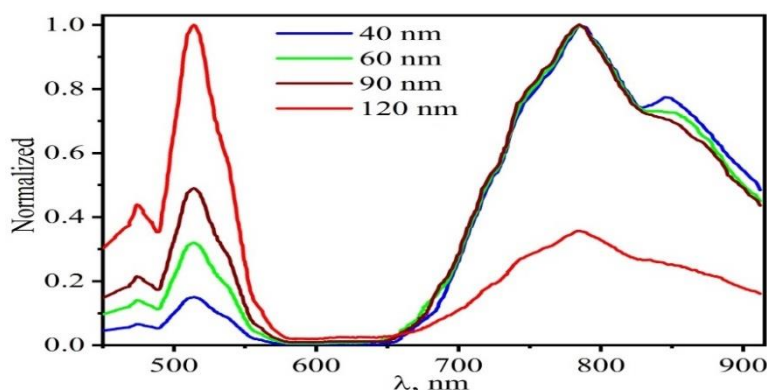


Рис. 1. Спектры люминесценции пленок TiO₂ с различной толщиной

Из рисунка видно, что максимальная интенсивность люминесценции наблюдается для пленок с толщиной 120 нм, спектр люминесценции имеет максимум на длине волны $\lambda = 514$ нм (2,41 эВ). Пленки с толщиной 90-60-40 нм имеют менее интенсивную люминесценцию с максимумами на длине волнах $\lambda = 474$ нм (2,62 эВ) и $\lambda = 514$ нм (2,41 эВ) соответственно. Тушения коротковолновой полосы люминесценции была обнаружена для пленки с толщиной 40 нм. Данная коротковолновая полоса может быть отнесена к пикам экситонной люминесценции, захваченными поверхностными состояниями и дефектами [2,3]. Из полученных спектров замечено, что толщина пленок отрицательно влияет на люминесценцию TiO₂, пленки с толщиной 60-120 нм демонстрируют самую высокую интенсивность люминесценции. Коротковолновые спектры люминесценции, возникающие при 474 и 514 нм для всех образцов, связаны с захваченным уровнем кислородных вакансий. Это объясняет, что дефекты в вакансиях кислорода увеличиваются с уменьшением толщины пленок дефект вакансии кислорода, однако создаст дефект Ti³⁺.

Список литературы

1. V. Melnyk, V. Shymanovska, G. Puchkovska, T. Bezrodna, G. Klishevich // Low-temperature luminescence of different TiO₂ modifications// J. Mol. Struct., 2005, Vol. 744–747, pp.573–576.
2. S.Ohta, T. Sekiya, S.Kurita // Pressure Dependence of Optical Properties of Anatase TiO₂ // Single Crystal Phys. Status Solidi, 2001, Vol. 223, № 1, pp.265–270.
3. I. Pelant, J. Valenta // Luminescence of excitons in Luminescence Spectroscopy of Semiconductors, 2012, pp. 161 –204.

Ж.Х. МУРЛИЕВА^{1,2}, М.Э. ИСХАКОВ¹, Р.М. ЭМИРОВ¹, М.Х. РАБАДАНОВ¹, Д.К. ПАЛЧАЕВ¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства, Махачкала, Россия

ПРИРОДА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ $Ti_{67}Al_{33}$

Анализ результатов исследований (*insitu*) электросопротивления и теплового расширения $Ti_{67}Al_{33}$ указывает на прямую корреляцию температурного коэффициента сопротивления и коэффициента теплового расширения.

ZH.KH. MURLIEVA^{1,2}, M.E. ISKHAQOV¹, R.M. EMIROV¹, M.KH. RABADANOV¹, D.K. PALCHAEV¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

NATURE OF THE FORMATION OF THE TEMPERATURE COEFFICIENT OF RESISTANCE OF $Ti_{67}Al_{33}$

An analysis of the results of studies (*in situ*) of the electrical resistance and thermal expansion of $Ti_{67}Al_{33}$ indicates a direct correlation between the temperature coefficient of resistance and the coefficient of thermal expansion.

Интерметаллид $Ti_{67}Al_{33}$ имеет плотноупакованную гексагональную решетку $D0_{19}$ (фаза α_2-Ti_3Al) с вакансиями в узлах, занимаемых атомами Ti . Наличие вакантных узлов в этом сплаве вычитания и их лабильность приводят к возникновению диффузионных фазовых переходов, сопровождаемых перераспределением атомов в элементарной ячейке без изменения кристаллической структуры [1]. Кроме того, число электронов в $Ti_{67}Al_{33}$, приходящихся на атом составляет $3,67(14,68/4)$, поэтому это соединение, наряду с металлическим, обладает ковалентным типом связи. Как показывают исследования электросопротивления (ρ) это приводит к тому, что для $Ti_{67}Al_{33}$ в разных интервалах температур от 300 до 1000 К наблюдается конкуренция доминирования металлического и полупроводникового типов проводимости [2]. Как показали результаты (*insitu*) исследований сопротивления и коэффициента теплового расширения (α) [3] зависимости $\rho=f(T)$ и $\alpha=f(T)$ имеют сходный вид, и характерные особенности на них, связанные со смешанным типом связи, приходится

на одни же температуры. Детальный анализ этой корреляционной связи указал на тесную связь (рис.1) между температурным коэффициентом сопротивления $d\rho/dT$ и термодинамическим комплексом α/T . Ранее [4], анализ связи непосредственно электросопротивления и α показал, что на интервалах между температурами, где наблюдаются явные изменения хода температурных зависимостей ρ и α выполняется правило:

$$\rho - \rho_0 = \rho^* \beta T, (1)$$

где $\beta=3\alpha$, ρ_0 – значение, экстраполированное в 0 К, ρ^* – характеристическое сопротивление. В отличие от нормальных металлов, у $Ti_{67}Al_{33}$ значения ρ_0 зависят от температуры, а ρ^* различно и изменяет свой знак в соответствующих интервалах температур.

Результаты, представленные на рисунке 1 и корреляция подобная (1) однозначно указывают на определяющую роль изменения межатомных расстояний на формирование температурной зависимости электросопротивления для проводников как с металлической, так полупроводниковой проводимостью.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002.

Список литературы

1. А.А. Клопотов, А.И. Потекаев, Э.В. Козлов и др. // Кристаллогеометрические и кристаллохимические закономерности образования бинарных и тройных соединений на основе титана и никеля // Томск: ТПУ, 2011, 312 стр.
2. Zh.Kh. Murlieva, D.K. Palchayev, M.E. Iskhakov et al. // J. of Physics: Conference Series, 2019, Vol. 1385, p. 012017.
3. Zh.Kh. Murlieva, D.K. Palchayev, M.E. Iskhakov et al. // High Temperature, 2019, Vol. 57, № 2, pp. 182-185.
4. D.K. Palchayev, Zh.Kh. Murlieva, M.Kh. Rabadanov et al. // J. of Phys.: Conference Series, 2020, Vol. 1686, p. 012051.

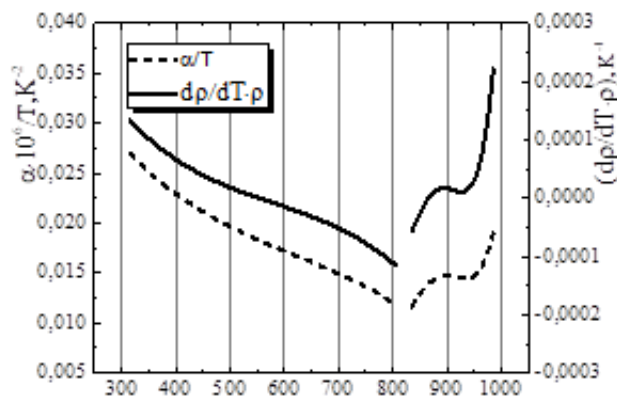


Рис.1. Температурные зависимости ТКС и α/T .

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ СДО НА ОПТИЧЕСКУЮ ШИРИНУ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПЛЕНКИ ZNO

Методом spin-coating на поверхности оптического стекла из раствора $Zn_5(OH)_8Cl_2$ в изопропаноле получены пленки ZnO. Также получены нанокomпозитные пленки, содержащие CdO при соотношениях CdO:ZnO (10:90), CdO:ZnO (30:70), CdO:ZnO (60:40). Установлено, что с возрастанием концентрации CdO наблюдается уменьшение оптической ширины запрещенной зоны в композитной пленке.

A.K. MUSABEKOVA, A.K. TUSUPBEKOVA

Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

EFFECT OF CdO IMPURITY ON THE OPTICAL BAND GAP OF A ZnO FILM

ZnO films were obtained from a solution of $Zn_5(OH)_8Cl_2$ in isopropanol by spin-coating on the optical glass surface. Nanocomposite films containing CdO at the ratios CdO:ZnO (10:90), CdO:ZnO (30:70), CdO:ZnO (60:40) were also obtained. It has been established that with an increase in the CdO concentration, a decrease in the optical band gap in the composite film is observed.

Получение пленок ZnO проводилось следующим образом: $Zn_5(OH)_8Cl_2$ (pure 99.9% Sigma Aldrich, навеской $m=49.3$ мг) растворяли в объеме ($V=0.5$ мл) изопропанола (pure 99.9% Sigma Aldrich). Получение нанокomпозитных пленок CdO:ZnO в разных соотношениях проводилось следующим образом: $Cd(CH_3COO)_2$ (pure 99.9% Sigma Aldrich) и $Zn_5(OH)_8Cl_2$ (pure 99.9% Sigma Aldrich) растворяли в объеме ($V=0.5$ мл) изопропанола (pure 99.9% Sigma Aldrich). После раствор выдерживали 20 минут, затем в полученную смесь добавляли моноэтаноламин в количестве $V=36$ мкл. После растворы перемешивали при температуре $T=80^\circ C$ в течение 2 часов, а затем выдерживали в течение 24 часов при комнатной температуре. Полученный раствор наносили на поверхности оптического стекла методом центрифугирования при скорости вращения 4000 об/мин. После пленки отжигали в атмосфере воздуха при температуре $250^\circ C$ в течение 10 мин, затем при температуре $450^\circ C$ отжигали один час.

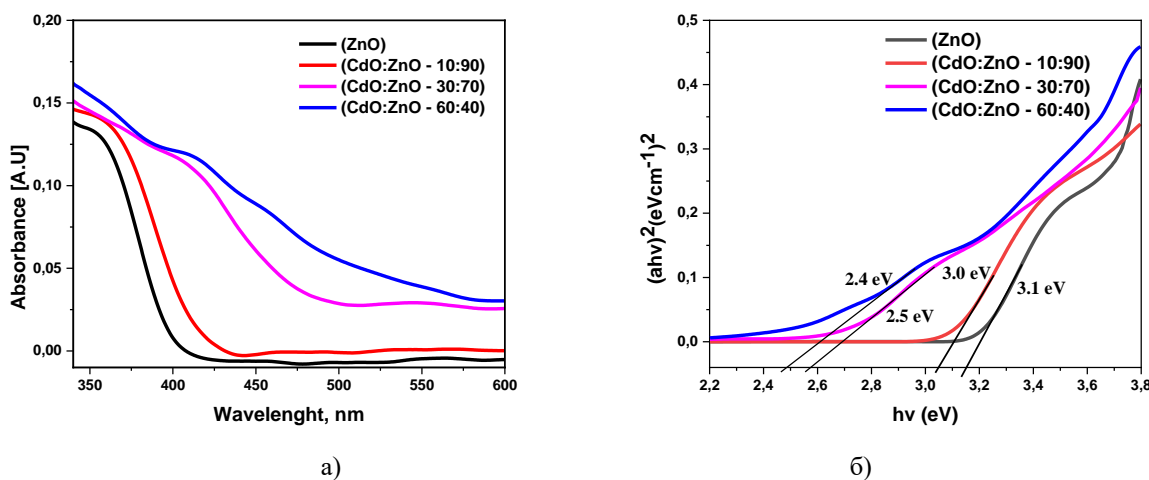


Рис. 1. Спектр поглощения (а) и график Таука (Taucplot) (б) композитных пленок

На рисунке приведены спектры поглощения пленки ZnO и при соотношениях CdO:ZnO (10:90, 30:70 и 60:40). Спектр поглощения типичен спектру поглощения широкозонных полупроводников[1]. На рисунке (б) приведен график Таука (Taucplot) для определения ширины запрещенной зоны при разных соотношениях CdO. Из рисунка видно, что возрастание концентрации CdO в композитной пленке приводит к уменьшению оптической ширины запрещенной зоны.

Список литературы

1. A. Bediaa, F.Z. Bedia, M. Aillerie, N. Maloufi, B. Benyoucef // Energy Procedia, 2014, Vol. 50, pp. 603 – 609.

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ ГРАНИЦЫ СОЕДИНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМГ6-ВТ1-0-08Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

В работе была изучена микроструктура границы соединения композиционного материала АМГ6–ВТ1–0–08Х18Н10Т после сварки взрывом (СВ) и её эволюция послеотжига. Энергодисперсионный анализ (ЭДС) показал наличие интерметаллической фазы TiAl на границе соединения АМГ6–ВТ1–0 и Ti₂Fe на границе соединения ВТ1–0–08Х18Н10Т. Было установлено, что отжиг (с выдержкой 1 ч) при температурах 450, 500 и 550°С, не приводит к росту и образованию интерметаллических фаз на межслойных границах композиционного материала.

N.N. NIYOZBEKOV, I.V. SAIKOV, A.YU. MALAKHOV, I.V. DENISOV
Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Chernogolovka, Russia

THE EFFECTS OF THE ANNEALING ON THE MICROSTRUCTURE OF ALMg6–TITANIUM–08CR18NI10TI COMPOSITE MATERIAL JOINT OBTAINED BY EXPLOSIVEWELDING

Abstract. In this work, the microstructure of the weld interface of the composite material AlMg6–Titanium–08Cr18Ni10Ti after explosive welding and its evolution after annealing was studied. Energy dispersive analysis (EDS) showed the presence of an intermetallic TiAl phase at the weld interface of the AlMg6–Titanium and Ti₂Fe at the weld interface of the Titanium–08Cr18Ni10Ti. It was found that annealing (with an exposure of 1 h) at temperatures of 450, 500 and 550°С does not lead to the growth and formation of intermetallic phases between the interlayer of the composite material.

Композиционные материалы, состоящие из алюминиево-магниевого сплава АМГ6 и стали широко применяются при производстве различных биметаллических переходников (БП) для палубных надстроек в судостроении, криогенного оборудования и др. [1]. Основной проблемой при производстве и эксплуатации БП является образование хрупких интерметаллических фаз на границе соединения в процессе сварки. Это может привести к снижению механических свойств переходника. Таким образом, получение БП с прочным сцеплением слоев при минимальном количестве интерметаллических фаз на границе соединения является актуальной задачей современного материаловедения.

Целью данного исследования являлось получение качественного соединения алюминиево-магниевого сплава АМГ6 с коррозионностойкой сталью 08Х18Н10Т через промежуточный слой из сплава титана ВТ1-0 и влияние отжига на микроструктуру границы соединения.

На рисунке 1 представлена микроструктура границы соединения АМГ6-ВТ1-0-08Х18Н10Т. Граница соединения после СВ имеет плоскую форму между АМГ6-ВТ1-0 (рис. 1а) и волнообразную между ВТ1-0-08Х18Н10Т (рис. 1б). На границе соединения АМГ6-ВТ1-0 из-за нагрева свариваемых поверхностей в процессе СВ образовался оплавленный слой с наличием интерметаллической фазы TiAl, вдоль всей границы соединения. Средняя толщина оплавленного слоя составляла около 12 мкм. На границе ВТ1-0-08Х18Н10Т в вершинах волн наблюдаются оплавы, которые имеют многокомпонентный состав (41% Ti, 25% Fe, 7,6% Cr, 2,9% Ni) с микротвердостью 665...1170 НВ, что свидетельствуют о наличии интерметаллических фаз (в основном Ti₂Fe). В структуре титана на границе соединения с 08Х18Н10Т после СВ присутствуют мелкозернистые рекристаллизованные области (рис. 1б), окружающие литые включения, толщиной около 12 мкм. После отжига при 450°С и выдержке в течение 1 часа, в АМГ6 наблюдается рекристаллизованная структура.

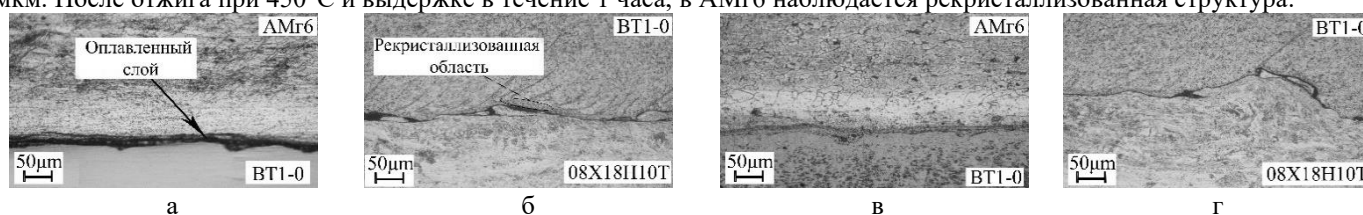


Рис. 1. Микроструктура границы соединения АМГ6–ВТ1–0–08Х18Н10Т:
а, б – после сварки взрывом; в, г – после отжига

Отжиг при температуре 500°С полностью снял наклеп в АМГ6. Повышение температуры отжига до 550°С привело к росту зерна, в областях, наиболее приближенных к границе соединения (рис. 1в). В структуре 08Х18Н10Т и ВТ1-0 после отжига видимых структурных изменений не обнаружено (рис. 1г). Было установлено, что отжиг при температурах 450, 500 и 550°С и выдержке в течение 1 часа, не приводит к росту и образованию интерметаллических фаз на межслойных границах композиционного материала.

Список литературы

1. W. Soyars, A. Basti, F. Bedeschi and others // International Journal of Fatigue, 2020, Vol. 139, p. 105736.
2. О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.Алисова //Металлургия, Москва. 1986, 440 стр.

И.В. НИКОЛАЕВ, Н.Г. КОРОБЕЙЩИКОВ
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

ОБРАБОТКА НЕЛИНЕЙНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ ПУЧКОМ АРГОНА

Рассмотрена ионно-кластерная бомбардировка поверхности монокристаллов титанил-фосфата калия и трибората лития при различных удельных энергиях кластеров. Продемонстрировано, что бомбардировка кластерами приводит к сглаживанию поверхности монокристаллов. Показано влияние различной удельной энергии кластеров на результат обработки. Обнаружены особенности воздействия кластерных ионов на титанил-фосфат калия и триборат лития.

I.V. NIKOLAEV, N.G. KOROBESHCHIKOV
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

PROCESSING OF NONLINEAR SINGLE CRYSTALS WITH ARGONCLUSTER ION BEAM

The cluster ion bombardment of the surface of single crystals of potassium titanyl phosphate and lithium triborate at the different specific cluster energy is considered. It is shown that the cluster bombardment leads to the surface smoothing of single crystals. The influence of different specific cluster energy on the result of processing is shown. Features of the impact of cluster ions on potassium titanyl phosphate and lithium triborate were found.

Ионно-кластерные пучки обладают уникальными физическими характеристиками, поэтому сегодня активно используются для модификации поверхности различных материалов (малоинвазивная полировка, формирование упорядоченных поверхностных наноструктур и др.), прецизионного анализа поверхности (масс-спектрометрия вторичных ионов, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия) и т.д. [1-3]. Взаимодействие газовых кластеров с твердой поверхностью сопровождается коллективными нелинейными эффектами, которые не могут быть описаны известными теоретическими моделями.

Нелинейные оптические монокристаллы, такие как титанил-фосфата калия (KTiOPO_4 , КТП) и трибората лития (LiB_3O_5 , LBO) [4, 5], широко используются для управления и преобразования лазерного излучения. Известно, что приповерхностный поврежденный слой (subsurface damage, SSD) толщиной от нескольких десятков до сотен нанометров является одним из определяющих факторов для функциональных характеристик нелинейных монокристаллов [6]. Ионно-кластерные пучки потенциально позволяют получить сверхгладкую поверхность с минимальным поврежденным слоем.

В данной работе изучена бомбардировка поверхности нелинейных монокристаллов КТП и LBO кластерными ионами аргона. Исходя из результатов предыдущих наших работ [7, 8], использовался несеперированный по массе ионно-кластерный пучок с различной удельной энергией кластеров E/N , где E – кинетическая энергия кластеров, N – средний размер кластеров.

Исследована модификация морфологии поверхности монокристаллов после ионно-кластерной бомбардировки в различных режимах. С использованием функции спектральной плотности мощности (power spectral density, PSD) шероховатости проанализировано изменение топографии поверхности. Показано, что высокоэнергетичный режим обработки обеспечивает высокую эффективность обработки (скорость травления достигает 5 нм/мин), а низкоэнергетичный режим позволяет получать сверхгладкую поверхность с субнанометровой шероховатостью (среднеквадратичная шероховатость R_q менее 0,5 нм). С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии обнаружена значительная селективность распыления, приводящая к изменению стехиометрии мишени в тонком приповерхностном слое толщиной около 10 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (грант FSUS-2020-0039) в части подготовки и анализа образцов и РФФ (грант №21-19-00046) в части обработки образцов кластерными ионами и анализом с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» НГУ.

Список литературы

1. А.Е. Иешкин, А.Б.Толстогузов, Н.Г. Коробейщиков, В.О. Пеленович, В.С. Черныш // УФН, 2022, Том. 192, №6.
2. V.N. Popok // Mater. Sci. Eng. R, 2011, Vol. 72, p. 137.
3. I. Yamada // Appl. Surf. Sci., 2014, Vol. 310, p. 77.
4. A. Mamrashev, N. Nikolaev, V. Antsygin, Y. Andreev, G. Lanskii, A. Meshalkin // Crystals, 2018, Vol. 8, p. 310.
5. Ch. Wu, G. Yang, M.G. Humphrey, C. Zhang // Coord. Chem. Rev., 2018, Vol. 375, p. 459.
6. J. Wang, Y. Li, J. Han, Q. Xu, Y. Guo // J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ., 2011, Vol. 6, p. 11001.
7. N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev, V.V. Atuchin, I.P. Prosvirin, A. Tolstogouzov, V. Pelenovich, D.J. Fu // Surfaces and Interfaces, 2021, Vol. 27, p. 101520.
8. Н.Г. Коробейщиков, И.В. Николаев, М.А. Роевко // ПЖТФ, 2019, Том 45, № 6, стр. 30.

П.И. НИКОЛЕНКО, И.В. ЩЕТИНИН, Л.Д. МОГИЛЬНИКОВА, Т.Р. НИЗАМОВ,
И.Г. БОРДЮЖИН, И.В. ДОРОФИЕВИЧ
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$, ПОЛУЧЕННЫХ ЦИТРАТНЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ

Гексагональные ферриты известны с середины прошлого века, за это время они получили широкое применение в качестве материалов для постоянных магнитов, носителей информации, элементов СВЧ-устройств и многое др. В настоящее время большое внимание ученых уделяется направлению, связанного с использованием гексагональных ферритов в биомедицинских целях в качестве материалов для терапии и диагностики. В связи с этим в настоящей работе была продемонстрирована возможность управления магнитными свойствами миксиферрита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ посредством замещения ионов Fe^{3+} ионами In^{3+} для адаптации магнитных свойств и использования в магнитной гипертермии. Было достигнуто существенное снижение коэрцитивной силы материала при сохранении высокого уровня намагниченности насыщения. За счёт этого наблюдался нагрев материала при внесении в высокочастотное переменное магнитное поле.

P.I. NIKOLENKO, I.V. SHCHETININ, L.D. MOGILNIKOVA, T.R. NIZAMOV,
I.G. BORDYUZHIN, I.V. DOROFIEVICH
National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

THE STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ COMPOUNDS PREPARED BY THE CITRATE METHOD FOR MAGNETIC HYPERTHERMIA

Hexagonal ferrites have been known since the middle of the last century. During this time, they have been widely used as materials for permanent magnets, information carriers, elements of microwave devices, and much more. At the present time, scientists pay great attention to the use of hexagonal ferrites in biomedical purposes as materials for therapy and diagnostics. In this regard, in this work, we demonstrated the possibility of controlling the magnetic properties of strontium hex ferrite $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ by replacing Fe^{3+} ions with In^{3+} ions to adapt the magnetic properties and use in magnetic hyperthermia. We have achieved a significant reduction in the coercive force of the material while maintaining a high level of saturation magnetization. Due to this, we observed the heating of the material when it was introduced into a high-frequency alternating magnetic field.

В данной работе цитратным методом с последующим отжигом при 1200°C были получены соединения $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ (где $x = 0.45, 0.99$ и 1.78). Фазовый анализ проводился на дифрактометре Rigaku Ultima IV с $\text{CoK}\alpha$ -излучением и графитовым монохроматором, магнитные свойства измерялись на вибромагнитометре VSM-250 в полях до 1600 кА/м, исследования морфологии частиц проводились на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM-IT500. Измерение температуры образцов при внесении их в переменное высокочастотное магнитное поле регистрировалось при помощи инфракрасной камеры. По данным изменения температуры во времени были рассчитаны параметры SLP (specific loss power – удельная мощность потерь) и ILP (intrinsic loss power – мощность собственных потерь).

По данным фазового анализа все синтезированные образцы содержали не менее 97% фазы гексаферрита стронция. Степень легирования определялась по изменению периодов решетки фазы $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$. Измерения магнитных свойств показали, что по мере увеличения степени замещения железа индием от $x = 0.45$ до 1.78 происходит снижение коэрцитивной силы с 188.9 кА/м до 22.3 кА/м, при этом удельная намагниченность снижается с 63.6 А·м²/кг до 42.9 А·м²/кг. По данным СЭМ частицы всех трёх образцов после высокотемпературного отжига представляли собой крупные агломераты, которые состояли из частиц размером $0.5 \dots 5$ мкм.

Результаты измерений и рассчитанные параметры SLP и ILP для образца с $x = 1.78$ представлены в таблице 1. Максимальные параметры SLP и ILP достигнуты при напряженности поля 19.94 кА/м и частоте 261 кГц. Однако нагрев до температуры в 41°C был достигнут лишь при высокой концентрации образца 56.67 г/л.

Таблица 1. Результаты магнитной гипертермии образца $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$, где $x=1.78$

Концентрация, г/л	Время измерения, с	Частота поля, кГц	Напряжённость поля, кА/м	Начальная температура, °С	Конечная температура, °С	SLP, Вт/г	ILP, (нГн·м ²)/кг
10.00	120	261	19.94	20	22	6.97	0.067
56.67	120	261	19.94	23	41	11.07	0.107
56.67	120	508	11.96	22	31	5.54	0.076
56.67	120	144	19.94	21	27	3.69	0.064

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (код проекта 0718-2020-0037).

SP-СОДЕРЖАЩИЕ ПЛЕНКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ДЕГИДРОГАЛОГЕНИРОВАНИЯ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА, КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕЗИСТИВНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

В работе представлены результаты исследования структуры пленок, полученных методом дегидрогалогенирования поливинилиденфторида. Методами просвечивающей электронной микроскопии, электронной дифракции и инфракрасной спектроскопии показано, что в структуре пленок присутствует sp-гибридизованный углерод. Исследования сенсорного отклика свидетельствуют о возможности использования полученного материала в качестве основы для резистивных газовых сенсоров.

O.YU. NISHCHAK, I.F. NURIAHMETOV, I.A. ZAVIDOVSKIY, O.A. STRELETSKIY

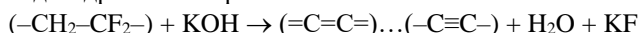
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

SP-CONTAINING FILMS SYNTHESIZED BY DEHYDROHALOGENATION OF POLYVINYLIDENE FLUORIDE AS A PROMISING MATERIAL FOR RESISTIVE GAS SENSORS

This paper presents the results of structural analysis of the films obtained by the dehydrohalogenation of polyvinylidene fluoride. Transmission electron microscopy, electron diffraction and Fourier-transform infrared spectroscopy have shown the presence of sp-hybridized carbon in the films structure. Sensor response studies showed the possibility of application of the obtained material as basis for resistive gas sensors.

В настоящее время ведутся активные разработки в области газовых сенсоров на основе углеродных наноструктур [1,2]. Такие сенсоры способны к селективному и быстрому обнаружению низких концентраций молекул газа. В основе работы резистивных сенсоров лежит эффект изменения электрофизических свойств наноструктур при взаимодействии материала сенсора с детектируемым газом. Однако резистивные сенсоры обладают относительно низкой селективностью, вследствие чего актуальной задачей является поиск новых материалов и модификация структуры, направленные на её увеличение.

Для получения пленок поливинилиденфторида (ПВДФ) производилось растворение ПВДФ-прекурсора в смеси N,N-диметилацетамида (70%) и ацетона (30%) при постоянном нагреве до температуры, не превышающей температуры кипения растворителя. Далее раствор высушивался до полного испарения растворителя. Полученная тонкая прозрачная пленка ПВДФ подвергалась реакции дегидрогалогенирования:



с последующим промыванием в этиловом спирте и дистиллированной воде.

Структура полученных образцов анализировалась методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (рис.1а), электронной дифракции и инфракрасной (ИК) спектроскопии. На рис.1б представлен ИК-спектр исследуемой пленки. Линии, наблюдавшиеся в спектре, преимущественно относятся к колебаниям в структуре ПВДФ. Также присутствуют линии 2173 см⁻¹ и 1600 см⁻¹, характерные для колебаний С≡С и С=C связей соответственно, что свидетельствует о присутствии в структуре образцов sp-гибридизованных цепочек, имеющих стабилизаторы и сшивки.

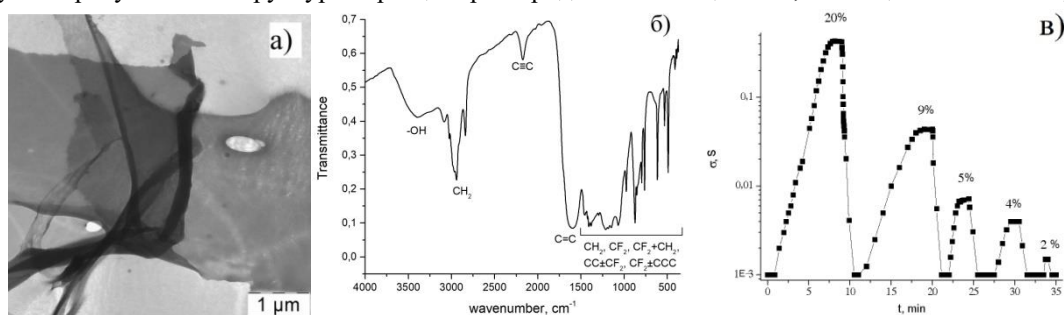


Рис. 1. (а) Изображение в ПЭМ, (б) ИК-спектр исследуемой пленки, (в) ее сенсорный отклик.

На поверхность пленок методом магнетронного осаждения осуществлялось напыление металлических контактов. На базе полученных структур были изготовлены резистивные сенсоры, которые помещались в замкнутый объем с возможностью подачи паров этанола, водного аммиака или воды. Результаты измерения сенсорного отклика представлены на рис.1в.

Список литературы

1. H. Nazemi, A. Joseph, J. Park, A. Emadi // Sensors, 2019, Vol. 19, № 6, p. 1285.
2. E. Llobet // Sens. Actuators B Chem., 2013, Vol. 179, pp. 32-45.

М.Т. НОРМУРАДОВ¹, А.С. РЫСБАЕВ², Д.А. НОРМУРОДОВ¹, К.Т. ДОВРАНОВ¹, Х.Т. ДАВРАНОВ¹

¹Каришинский государственный университет, Кариши, Узбекистан

²Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова, Ташкент, Узбекистан

СОСТАВ И ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ BaSi₂, СОЗДАННЫХ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ Si

В данной работе мы впервые попытались получить наноразмерные фазы BaSi₂ на различных глубинах Si и создать наноразмерные гетеросистема типа Si/BaSi₂/Si.

M.T. NORMURADOV¹, A.S. RISBAEV², D.A. NORMURODOV¹, K.T. DOVRANOV, H.T. DAVRANOV

¹Qarshi Davlat Universitii, Qarshit, Uzbekistan

²Tashkent state technical university named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan

COMPOSITION AND ELECTRONIC STRUCTURE OF NANOSIZED BaSi₂ PHASES CREATED IN THE SUBSURFACE REGION OF Si

In this work, we first attempted to obtain nanosized BaSi₂ phases at various Si depths and to create nanosized heterosystems of the Si/BaSi₂/Si type.

Имплантация ионов Ba⁺, прогрев образцов, исследование их состава и параметров энергетических зон с использованием методов ЭОС и измерением интенсивности проходящего через образец света проводились в одном и том же приборе в условиях сверхвысокого вакуума ($P = 10^{-7}$ Па). Морфология поверхности изучалась методом растровой электронной микроскопии РЭМ (*Jeol*).

Наноразмерные фазы и слои BaSi₂ в различных глубинах приповерхностного слоя Si получены имплантацией ионов Ba⁺ с вариацией энергия E_0 в пределах 20 – 40 кэВ и дозы $D = 10^{14} - 10^{17}$ см⁻², при вакууме не хуже 10^{-7} Па.

На рисунок 1 приведены концентрационные профили распределения Ba по глубине h для Si (111), имплантированного ионами Ba⁺ с $E_0 = 20$ кэВ при дозе насыщения $D \approx 10^{17}$ см⁻² до и после прогрева при $T = 950$ К в течение 40 мин. Анализ оже-спектров показали, что кривые проходит через максимум на глубине $h = 16 - 18$ нм. На зависимости $C_{Ba}(h)$, измеренные до прогрева, наблюдается шириной максимум с концентрацией ~ 20 ат. %. После прогрева происходит увеличение концентрации атомов в области максимума до 30 – 35 ат. % и существенное уменьшение полуширины кривого распределения $C_{Ba}(h)$. При этом положения пика кремния L_{2,3}VV ($E = 92$ эВ) смещается до энергии ~ 96 эВ, что характерна для BaSi₂. Из кривой 2 видно, что ширина слоя BaSi₂ составляет $\sim 10 - 12$ нм. На границах Si/BaSi₂/Si формируется переходные слои с толщиной $\sim 6 - 8$ нм, что значительно больше, чем в случае CoSi₂ / Si / CoSi₂ [1].

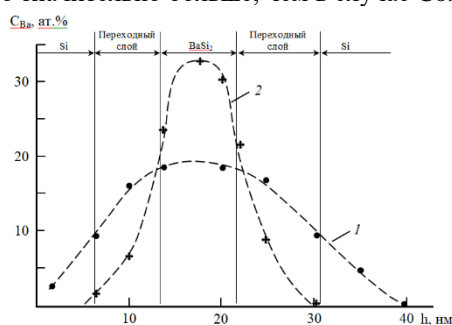


Рис. 1. Профили распределения атомов Ba по глубине h Si, имплантированного ионами Ba⁺ с энергией $E_0 = 20$ кэВ при $D \approx 10^{17}$ см⁻²: 1 – до прогрева; 2 – после прогрева при $T = 950$ К.

Для этой системы на рис. 2 приведена зависимость I_{BaSi_2}/I_{Si} от энергии фотонов $h\nu$. Из рисунка 2 видно, что до определенного значения $h\nu$ интенсивности света практически не меняется. В случае чистого Si начинается с $h\nu \approx 1$ эВ, а в случае Si с нанослоем BaSi₂ – с $h\nu \approx 0.5$ эВ. Экстраполяция этой части кривых к оси $h\nu$ дает примерное значение ширины запрещенной зоны. Видно, что E_g для чистого Si составляет ~ 1.1 эВ, а для BaSi₂ – ~ 0.67 эВ.

В случае имплантации ионов Ba⁺ с $E_0 = 20$ кэВ и дозой $D = 10^{15}$ см⁻² в глубине $\sim 16 - 18$ нм образовались нанокристаллические фазы с диаметром 8 – 10 нм. Из энергетических соображений можно полагать, что эти фазы в отличие от поверхностных фаз, имеют сферическую форму [2].

Список литературы

1. Y.S. Ergashov, B.E. Umirzakov // Tech. Phys., 2018, Vol. 63(12), pp. 1820-1823. DOI: 10.1134/S1063784218120058.
2. А.Н. Михайлов, Д.В. Гусейнов, А.И. Белов и др. // Ионно-лучевая инженерия наноматериалов на основе кремния. // Труды XXI межд. конф. ВИП-2013, 2013, Том 2, стр. 31-36.

Г.С. НУЖДОВ, В.Н. АВДИЕВИЧ, С.З. МИРЗАЕВ, Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА МИГРАЦИЮ ВАКАНСИЙ В КРИСТАЛЛАХ LaF_3

Представлены результаты кванто-химических расчетов по определению влияния рельефа поверхности в суперионных кристаллах LaF_3 на процесс миграции вакансий ионов фтора к этой поверхности. Показано, что наиболее энергетически выгодной является миграция вакансий на выступы поверхности, что позволяет управлять направлением переноса ионов за счет ее рельефа.

G.S. NUZHDOV, V.N. AVDIEVICH, S.Z. MIRZAEV, F.R. AHMEDZHANOV

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies AS RUz. Tashkent, Uzbekistan

INFLUENCE OF THE SURFACE RELIEF ON THE MIGRATION OF VACANCIES IN CRYSTALS LaF_3

The results of quantum-chemical calculations to determine the influence of the surface topography in LaF_3 superionic crystals on the process of migration of fluorine ion vacancies to this surface are presented. It is shown that the most energetically favorable is the migration of vacancies to the protrusions of the surface, which makes it possible to control the direction of ion transport due to its relief.

Суперионные кристаллы – класс твердых материалов, в которых фазовые превращения связаны с температурным разупорядочением одной из кристаллических подрешеток и переходом кристалла из диэлектрического состояния в суперионное [1]. При этом проводимость может достигать значений $\sim 10^{-4}$ – 10^0 См/см. Объектом изучения выбран суперионный кристалл LaF_3 , структура которого соответствует тригональной сингонии с пространственной группой $P3$ и шестью формульными единицами в элементарной ячейке [2].

Путем моделирования изучен процесс перемещения вакансии иона фтора на поверхность кристалла с различным рельефом, а именно – на ровную поверхность, на поверхность с выемкой и поверхность с выступом. Глубина выемки и высота выступа не превышали 7 \AA (высота элементарной ячейки LaF_3). Расчеты проводились при помощи программы квантово-химических расчетов MOPAC 2016 [3]. На первом этапе вычислялась энергия образования кристаллической решетки с вакансией в центре. Затем вычислялась энергия образования кристаллической решетки, в которой на место этой вакансии перемещался ион фтора, находящийся в соседней полуплоскости, расположенной ближе к поверхности. Эта операция повторялась, пока вакансия не оказывалась на поверхности кристалла. При этом устанавливалась разность энергий между решеткой с вакансией в ее центре и всеми остальными решетками кристалла, в которых вакансия после перемещения располагалась ближе к поверхности. Результаты расчета представлены на рисунке 1.

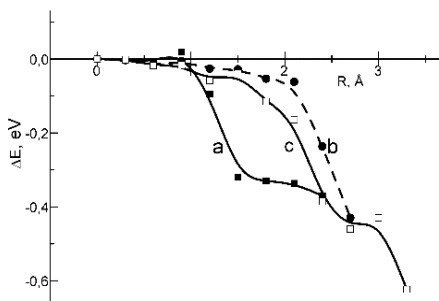


Рисунок 1. Потенциальный рельеф на пути миграции вакансий ионов фтора к поверхности.

Процессу миграции вакансии к ровной поверхности соответствует кривая **b**, соответственно, миграции к выемке – кривая **a** и миграции к выступу – кривая **c**. Хорошо видно, что энергетически наиболее выгодной позицией будет обладать вакансия, оказавшаяся на вершине выступа. Менее выгодна позиция на ровной поверхности, а позиция в выемке является самой затратной с точки зрения энергии образования. Таким образом, при наличии вакансий в объеме, они будут «всплывать» на поверхность, тем самым увеличивая проводимость суперионного кристалла за счет вакансионного механизма переноса ионов по поверхности. При этом направлением переноса ионов можно управлять, создавая рельеф определенной конфигурации.

Список литературы

1. Ю.Я. Гуревич, Ю.И. Харкац // Суперионные проводники // Москва: Наука, 1992, 244 с.
2. Н.И. Сорокин, Б.П. Соболев // Собственная фтор-ионная проводимость кристаллических матриц фторидных супериоников: BaF_2 (тип флюорита) и LaF_3 (тип тисонита) // Физика твердого тела, 2019, том 61, №1, стр. 53-58.
3. James J. P. Stewart // MOPAC // Stewart Computational Chemistry, 2016.

С.А. НУРЕТДИНОВ

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДАМИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ ПЛАЗМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА, ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрено получение наночастиц методом импульсной лазерной абляции и методом электрического взрыва проводников в жидкости. Описаны макеты соответствующих установок и приведены технологические параметры синтеза наночастиц.

S.A. NURETDINOV

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

PRODUCTION OF NANOPARTICLES BY METHODS USING THE PLASMA STATE OF A SUBSTANCE FOR THE MODIFICATION OF COMPOSITE MATERIALS

The production of nanoparticles by the method of pulsed laser ablation and the method of electric explosion of conductors in a liquid is considered. The layouts of the corresponding installations are described and the technological parameters of the synthesis of nanoparticles are given.

В настоящее время широко используется модификация композиционных материалов наноструктурированным веществом [1]. Высокий уровень активности наночастиц обуславливает эффект значительного влияния малых их концентраций на физико-механические свойства композиционных материалов. Малые концентрации наночастиц введенные в композиционные материалы приводят к значительному изменению их прочности, твердости, термостойкости, триботехнических свойств. Наномодифицированные композиционные материалы получили широкое применение в машиностроении, автомобилестроении, медицине. В этой связи наблюдается повышенный интерес к новым методам диспергирования веществ на наноструктуры.

Для получения наночастиц в настоящее время широко используется плазменное состояние вещества. На первой стадии вещество превращается в плазму, а на второй - из плазмы синтезируются наноструктуры. Отличительной особенностью методов, использующих плазменное состояние вещества, является высокая управляемость процессом синтеза и возможность получения заданных размерных распределений и морфологии наноструктур, а также наноструктур сложного состава. Одним из таких методов является лазерная абляция материалов в жидкости или плотном газе [2,4]. Для этой цели нами использовались эксимерные лазеры, аналогичные описанным в [5,6], первая, вторая и третья гармоники YAG:Nd³⁺-лазера LS-2147, который генерировал наносекундные импульсы излучения (~10 нс) с энергией от 0,05 до 1 Дж. Лазерное излучение поворотной призмой направлялось вертикально вниз и фокусировалось на образце находящемся в кювете в жидкости. Диспергированию подвергались медь, алюминий, графит, вольфрам и др. в дистиллированной воде, этаноле, ацетоне и других органических жидкостях. Более 60% полученных наночастиц находилось в размерном диапазоне до 60 нм. На размерном распределении наблюдался максимум, расположение которого зависело от материала, энергии лазерного импульса и свойств жидкости.

Вторым, исследуемым нами методом получения наноструктур, использующим плазменное состояние вещества, является их синтез в плазме электровзрывного разряда в жидкости [7,8]. За микро- или миллисекундные времена диспергируемый материал нагревается, плавится, испаряется, ионизируется и превращается в плазменный канал, по которому протекает электрический ток большой величины (происходит его электрический взрыв). Указанные процессы сопровождаются нарастающим давлением и температурой. Синтез наночастиц происходит в плазме разрядного канала на стадии уменьшения силы тока, когда тепловое излучение плазмы не компенсируется подводом энергии к ней электрическим током. В результате из атомов и ионов материала взорвавшегося проводника формируются наноструктуры. В их формировании могут принимать участие также продукты разложения жидкости.

Были получены наносuspensions серебристого, графитового, медного и других оттенков (в зависимости от диспергируемого материала) с заметно сниженной светопропускаемостью, по сравнению со светопропусканием чистой жидкости. Проведенные АСМ-исследования показывают, что при электровзрывном диспергировании образуются частицы по форме близкие к сферической. Основное количество наночастиц расположено в размерном диапазоне 20-100 нм. Положение максимума размерного распределения зависит от вводимой энергии. Этот метод характеризуется высокой производительностью, низкой стоимостью и относительной простотой реализации.

Список литературы

9. С.С. Иванчев, А.Н. Озерин // Высокомолекулярные соединения, 2006, Том 48, №8Б, стр. 1541-1544.
10. К.Ф. Зноско // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы, 2020, Том 10, № 3, стр. 100-113.
11. К.Ф. Зноско, С.Д. Лещик // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы, 2021, Том 11, № 1, стр. 45-58.
12. И.Г.Сергиенко, К.Ф. Зноско, С.Д.Лещик // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы, 2017, Том 7, стр. 47-57.
13. [С.С. Ануфрик, К.Ф. Зноско, А.Д. Курганский](#) // Квантовая электроника, 1989, Том 16, № 11, стр. 2228–2231.
14. [С.С. Ануфрик, К.Ф. Зноско](#), А.П. Володенков // Журнал прикладной спектроскопии, 1999, Том 66, № 5, стр.702-707.
15. И.Г.Сергиенко, К.Ф. Зноско, В.В.Тарковский // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы, 2017, Том 7, № 1, стр. 56-65.
16. И.Г.Сергиенко, К.Ф. Зноско, В.В.Тарковский // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы, 2018, Том 8, № 1, стр. 50-61.

К ВОПРОСУ О КОМБИНИРОВАННЫХ (2D/3D) - ОБЪЕКТАХ И ИХ СВОЙСТВАХ

Теоретически рассмотрен вопрос о соотношении объёмных и поверхностных свойств комбинированных (2D/3D) объектов с точки зрения варьируемого уровня Ферми, являющегося фактором целостности всего объекта, как пример явления самоорганизованной критичности.

B.L. OKSENGENDLER, M.SH. KURBANOV, S.E. MAKSIMOV, N.N. NIKIFOROVA
Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

THE QUESTION OF COMBINED (2D/3D) OBJECTS AND THEIR PROPERTIES

Theoretically, the issue of the ratio of volumetric and surface properties of combined (2D/3D) objects is considered from the point of view of the variable Fermi level, which is a factor of the integrity of the entire object, as an example of the phenomenon of self-organized criticality.

Современная физика конденсированного состояния (ФКС) все более осваивает концепцию complexity (сложность) [1,2]. При этом успех этого процесса оказался связанным с выделением в качестве объектов изучения: «нано», «фракталы», «системы с низкой размерностью», «хиральные системы», «иерархические структуры», в которых особенно ярко проявляются свойства сложности в условиях сильной неравновесности. Вместе с тем, в последнее время появились объекты с более тонкой градацией, а именно, низкоразмерные системы, комбинирующие свойства 2D и 3D, где D – топологическая размерность. К таким системам относятся нанопорошки, цеолиты, брикеты и др. Действительно, в этих системах доминирование свойств 2D или 3D в равной степени обусловлено как шкалой размеров, так и размерностей (обозначим это как 2D/3D).

Обоснуем такое выделение объектов (2D/3D) из всех существующих типов систем. Рассмотрим параллельно три типа таких систем: нанопорошки (слипшиеся сферы), цеолиты (системы с полостями) и брикеты (системы с порами). В таких системах реализуются как 3D свойства (внутренность шаров и остовов клеток), так и 2D (поверхность шаров и внутренняя поверхность пор). Используя квантовую статистику, наделим каждый тип этих частиц уровнем Ферми. Поскольку рассматривается единый объект, то их приведенный уровень Ферми одинаков. Пусть общее число состояний для объема и поверхности в каждом случае будут N_b и N_s , тогда как локальные уровни этих состояний: E_b и E_s . Тогда мы получим возможность просчитать зависимость уровня Ферми от соотношения объемной и поверхностной составляющих. Так, в качестве конкретного примера рассмотрим полупроводник, для которого объемное состояние является донором N_d , а приповерхностное – акцептором N_a . Тогда для невырожденного случая для нахождения уровня Ферми получим уравнение:

$$-\frac{N_d}{N_a} [1 + e^{-\varepsilon_a - \eta}]^{-1} + [1 + e^{\varepsilon_d + \eta}]^{-1} = \frac{N_c}{N_a} e^{\eta} + \frac{N_v}{N_a} e^{-\eta - \varepsilon_i}$$

где $N_a \sim R^2$, $N_d \sim R^3$, ε_d , ε_a , ε_i , η – приведенные величины энергии донора, акцептора, ширина запрещенной зоны и приведенный уровень Ферми. Видно, что, изменяя размер наночастиц или полостей, мы получаем доминирование либо 2D, либо 3D составляющей. Причем, точная компенсация является демаркационной линией для перехода систем друг в друга (2D-3D). Поскольку уровень Ферми является основой для расчета квантовых электронных свойств всей системы (в частности, уровней Тамма, механизма адсорбции вплоть до проявления самоорганизованной критичности [2], моделирование электронных структур по модели Андерсона для случайных потенциалов), то мы вынуждены заключить, что размер является дополнительной степенью свободы, регулирующей свойства изучаемого класса объектов. При этом важно отметить, что ширина запрещенной зоны внутри и на поверхности кристаллов различна, что приводит к варизонности, и что проявляется в случае веществ с ионной связью.

Существенно, что степень варизонности обусловлена еще и величиной кривизны поверхности, которая возрастает с уменьшением радиуса сферической наночастицы. Это приводит к важным выводам. Во-первых, увеличение доли поверхностных состояний (при постоянном радиусе наночастицы) возможно за счет ее фрактальной размерности, которая является еще одной степенью свободы. Во-вторых, если коллектив наночастиц имеет вероятностный разброс по радиусам, то это означает и случайный разброс по глубинам клинообразных потенциальных ям - ловушек электронов у поверхности наночастиц и такую ситуацию можно описать моделью случайных ям Андерсона [1]. Отметим, что в случае справедливости высказанных соображений, они должны быть включены в общую классификацию физической электроники [3].

Список литературы

1. P.W. Anderson // Science, 1977, Vol. 177, p. 393.
2. P. Bak // How nature works: The science of self-organized criticality // Springer- Verlag, 1996, p. 212.
3. Х.Б. Ашуров, М.В. Кремков, С.Е. Максимов, Б.Л. Оксенгендлер // Доклады Академии Наук РУз, 2021, № 4, стр. 43–47.

Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР¹, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ², Н.Н. НИКИФОРОВА¹, А.Ф. ЗАЦЕПИН³,
Н.А. КУЛАГИНА²

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии Наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

²Институт материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан

³Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЛОЖНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ РАДИАЦИЕЙ С ШИРОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ

Рассмотрены особенности радиационных процессов при воздействии высокоинтенсивного излучения от синхротрона и Большой Солнечной Печи. В рамках концепции «complexity» обсуждена роль существенно неравновесных процессов.

B.L. OKSENGENDLER¹, S.KH. SULEIMANOV², N.N. NIKIFOROVA¹, A.F. ZATSEPIN³,
N.A. KULAGINA²

¹Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

²Materials Science Institute of SPA «Physics-Sun» of AS RUz, Tashkent, Uzbekistan

³Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

RADIATION EFFECTS IN COMPLEX MATERIALS UNDER HIGH-INTENSITY RADIATION WITH A WIDE ENERGY SPECTRUM

The features of radiation processes under the influence of high-intensity radiation from the synchrotron and the Big Solar Furnace are considered. Within the concept of «complexity», the role of essentially nonequilibrium processes is discussed.

История радиационной физики конденсированного состояния (РФКС) продемонстрировала, что важнейшие ситуации прогресса в этой области связаны с тремя обстоятельствами: 1) открытием новых типов радиационного воздействия; 2) переходом к исследованию объектов с новыми свойствами; 3) формулировкой новой мощной концепции взаимодействия излучения с веществом. С начала XXI века стали одновременно реализовываться все указанные три фактора: создание и использование высокоинтенсивной радиации с широким энергетическим спектром (1); появление новых структурных понятий «нано», «фрактальность», «низкая комбинированная размерность», «хиральность», «иерархичность» (2); расширение концепции «complexity» на область РФКС, углубившее идеи комбинированной нелинейности и сильной неравновесности. Концентрированно вся методология «complexity» представлена на Рис.1. Специфика радиационного воздействия здесь заключена в синергетике, обеспечивающей степень неравновесности и нелинейности.

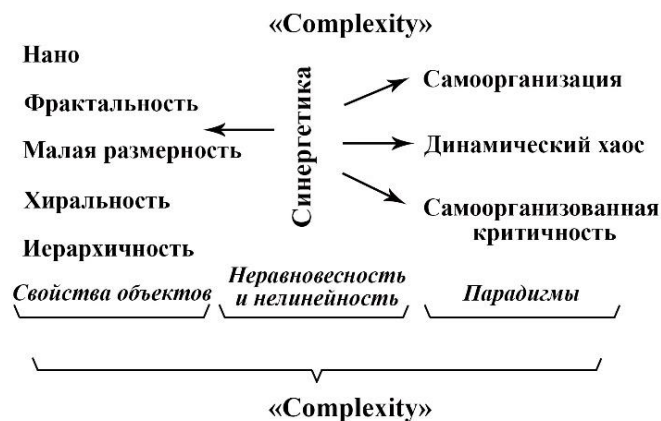


Рис. 1. Схема концепции «Complexity»

Рассмотрим применение этой схемы для случаев высокоинтенсивного электромагнитного излучения с широким диапазоном энергий (синхротронное излучение и Большая Солнечная Печь, Узбекистан). Среди принципиально новых факторов воздействия выделяются следующие: 1) существенная вероятность одновременного возбуждения малых областей вещества квантами из разных диапазонов энергий; 2) возможность возбуждения как одной, так и различных платформ иерархических структур; 3) сочетание в Большой Солнечной Печи сильного градиента температур от фокуса к периферии образца с действием высокоэнергетичных фотонов. Уже этих факторов оказывается достаточно для появления разнообразных синергетических структур на базе модифицированных нелинейностью элементарных атомных перестроек (дефектообразования, диффузии, квазихимических реакций). Результаты экспериментов и их анализ в рамках вышеописанной теоретической методики позволяет понять эффекты из трёх парадигм, отмеченных на Рис.1.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКУЮ ШИРИНУ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ

В работе представлены результаты исследования влияния температуры отжига In_2O_3 на оптические характеристики. Получения пленок оксида индия осуществлялось из раствора гидрат нитрата индия методом spin-coating. Термический отжиг проводился в диапазоне температур 200°C - 500°C . Установлено, что повышение температуры отжига пленок приводит к возрастанию поглощения и оптической ширины запрещенной зоны.

G.I. OMARBEKOVA, A.M. ZHAKANOVA, A.M. MUKHAMEDZHANOVA
Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

EFFECT OF ANNEALING TEMPERATURE ON THE OPTICAL BAND GAP OF INDIUM OXIDE FILMS

The paper presents the results of a study of the effect of the In_2O_3 annealing temperature on the optical characteristics. Indium oxide films obtained from a solution of indium nitrate hydrate by spin-coating. Thermal annealing was carried out in the temperature range of 200°C - 500°C . It is achieved that an increase in the annealing temperature of the films leads to an increase in the absorption and optical band gap.

Для определения влияния температуры отжигана ширину запрещенной зоны In_2O_3 были измерены спектры поглощения, отожженных при разных температурах (рис.1).Измерение спектров поглощения показали, что поглощение пленок увеличивается с возрастанием температуры отжига[1].

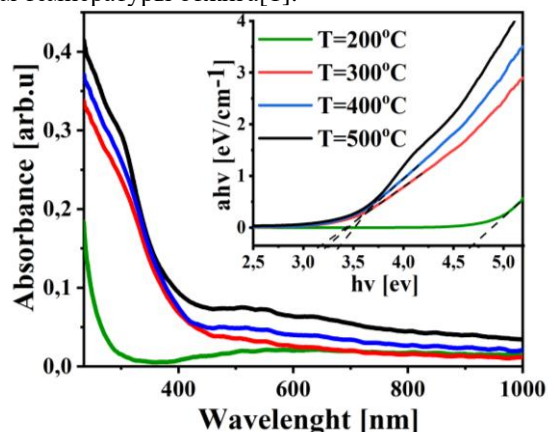


Рис. 1. Спектры поглощения и ширины запрещенной зоны пленок In_2O_3

Из графика видно, что при температуре отжига 200°C оптическая ширина запрещенной зоны составляет 4.68 eV [1,2]. Увеличение температуры отжига от 300°C до 500°C приводит к возрастанию оптической ширины запрещенной зоны, это связано с уменьшением плотности вакансии кислорода в пленке при повышении температуры отжига. Результаты приведены в таблице.

Таблица. Параметры спектров оптического поглощения и ширины запрещенной зоны пленок In_2O_3 при разных температурах отжига

№	Температура отжига, $^\circ\text{C}$	D, arb.u. ($\lambda = 235\text{nm}$)	Band gap, eV
1	200	0.18	4.68
2	300	0.33	3.21
3	400	0.36	3.32
4	500	0.41	3.41

В данной работе проведено исследование влияние температуры отжига пленки In_2O_3 на его оптические свойства. Показано, что с увеличением температуры отжига от 300°C до 500°C возрастает поглощение пленок и оптическая ширина запрещенной зоны.

Список литературы

1. R.A. Ismail // Preparation of colloidal In_2O_3 nanoparticles using nanosecond laser ablation in water // Micro & Nano Letters, 2011, Vol. 6, Iss. 11, pp. 951-954.
2. A. Yahiaa, A. Attafa, H. Saidia, M. Dahnouna, C. Khelifia, F. Bouhdjera, A. Saadia, H. Ezzaouiab // Surfaces and Interfaces, 2019, Vol. 14, pp. 158-165.

Н.А. ОНОПРИЕНКО, А.В. ВАЛЬКОВ, Н.А. ЩЕРБИНА, В.Р. КРИПАК
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЗМ ИЗ ФГ

Исследован метод переработки фосфогипса и извлечения редкоземельных элементов с использованием соляной кислоты, исследовано влияние температуры и времени выщелачивания на степень извлечения редкоземельных элементов.

N.A. ONOPRIENKO, A.V. VALYKOV, N.A. SHCHERBINA, V.R. KRIPAK
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

PROBLEMS OF TREATMENT OF PHOSPHOGYPSUM WITH EXTRACTION OF RARE EARTH METALS

A method of treatment of phosphogypsum and extracting rare earth elements using hydrochloric acid was researched, and the effect of temperature and leaching time on the degree of extraction of rare earth elements was studied.

Фосфогипс (ФГ) является побочным продуктом при производстве фосфорной кислоты и удобрений. По причине загрязненности фосфатными, фтористыми и другими соединениями, ФГ не находит прямого пути утилизации переработкой в необходимые современному миру продукты.

Вследствие невозможности полной утилизации, складирование и загрязнение окружающей среды (ОС) фосфогипсом, а именно природных вод, почв и др., является немаловажной проблемой, как и то, что в составе ФГ нередко входят летучие вещества, засоряющие воздух. Самым летучим компонентом состава является фтороводород. Так, при сухом складировании в газовую фазу выделяется в среднем 0,1 % фтора в перерасчете на сухое вещество, содержавшегося в фосфогипсе. В пыли, поднимающейся над отвалами, содержится в среднем до 10 г фтора на 1 т фосфогипса. Примерно 10 % фтора вымывается осадками.

В состав ФГ также входят и полезные, необходимые для современного производства редкоземельные элементы (РЗЭ). В современном производстве редкоземельных элементов больше половины затрат приходится на добычу руды и ее обогащение. Перспективным является использование техногенного сырья, когда редкоземельные элементы извлекаются попутно. Таким образом, можно решать одновременно 2 проблемы: проблему перепроизводства ФГ и извлечения РЗЭ.

На данный момент существует множество технологий выщелачивания РЗЭ из ФГ, основными и наиболее используемыми из которых являются: сернокислотная технология, экстракция серной кислотой, азотнокислая технология. Все еще идет поиск наиболее оптимального и продуктивного метода при наименьших затратах и наибольшем результате.

Целью работы является определение и сравнение технологических параметров при извлечении РЗЭ из ФГ.

Объекты исследования в данной работе: гипс технический ТУ 2141-693-00209438-2015 из отвального фосфогипса Балаковского филиала АО «Апатит», кислота соляная ГОСТ 857-95.

В работе проведен сравнительный анализ различных условий (температура, время, концентрация) выщелачивания и выбраны оптимальные условия при неизменных компонентах (ФГ и соляная кислота).

В данной работе проведен анализ особенностей извлечения РЗЭ из отходов производства минеральных удобрений – фосфогипса. Результаты в дальнейшем могут быть использованы в технологии получения соединений редкоземельных металлов при комплексной переработке апатитов.

Процесс извлечения РЗЭ из ФГ включал следующие стадии: стадия растворения, стадия выщелачивания и стадия фильтрования.

Для определения содержания РЗЭ в полученном фильтрате использовался метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП).

Переработка ФГ направлена на решение экологических проблем, создаваемых его складированием в отвалах заводов фосфорных удобрений. Переработка ФГ позволяет выпускать ценную химическую продукцию, имеющую устойчивый спрос на рынке, при этом снижается отрицательное воздействие компонентов фосфогипса на окружающую среду.

Первичные результаты подтвердили влияние температуры и времени выщелачивания на степень извлечения РЗЭ соляной кислотой.

Список литературы

1. A.V. Valykov // J. M. MEPHI, 2008, p. 37.
2. A.V. Valykov, T.V. Bashlikova, V.Iv. Petrov // J. Non-ferrous metals, 2012, № 3, p. 40.
3. N.A. Onoprienko, V.R. Kripak, N.A. Shcherbina, E.A. Mesyats // Actual Problems and Ways of Development of Energy, Engineering and Technologies // Collection of proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, 2021, Vol. 2, p. 64.

Д.К. ПАЛЧАЕВ¹, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹, А.Э. РАБАДАНОВА¹,
Ж.Х. МУРЛИЕВА^{1,2}, М.Х. РАБАДАНОВ¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства, Махачкала, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ НАНОКЕРАМИКИ YBCO

Показано, что в наноструктурированной YBCO формирование температурной зависимости сопротивления определяется распадом основной сверхпроводящей фазы на фазы с более низкими значениями температур перехода в сверхпроводящее состояние. Такой распад приводит к линейной зависимости электросопротивления от температуры в интервале от 300К до T_c при любом типе проводимости. Указывается на возможность расшифровки линейной связи температурного коэффициента сопротивления с уровнем допирования для этой керамики на основе слэтеровских представлений о конденсированной среде.

D.K. PALCHAEV¹, S.KH. GADZHIMAGOMEDOV¹, A.E. RABADANOVA¹,
ZH.KH. MURLIEVA^{1,2}, M.KH. RABADANOV¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

FORMATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL RESISTANCE OF YBCO NANOCERAMICS

It is shown that the formation of the temperature dependence of the resistance in nanostructured YBCO is determined by the decay of the main superconducting phase into phases with lower superconducting transition temperatures. Such decay leads to a linear temperature dependence of the electrical resistance in the range from 300 K to T_c for any type of conduction. It is pointed out that it is possible to decipher the linear relationship between the temperature coefficient of resistance and the level of doping for this ceramic based on Slater's ideas about a condensed medium.

Установление природы высокой проводимости сложного оксида YBCO, в котором нет обобществлённых электронов, как это следует из представлений о металлической связи, актуально в плане эффективных приложений в перспективе. Более того, нет ясности в понимании не только природы, обеспечивающей ему сверхпроводимость, но и факта ее сохранения, причем с повышением температуры [1] перехода в это состояние.

В настоящем докладе обсуждается особенность формирования зарядовых возбуждений в блоке проводимости YBCO для наноструктурированной керамики, в среднем по решетке. Эта особенность определяется распадом основной сверхпроводящей фазы с $T_c \approx 92$ К на фазы с более низкими значениями температур перехода в сверхпроводящее состояние. Такой распад обнаруживается [2] при исследованиях температурных коэффициентов электросопротивления, а так же электронных составляющих коэффициента теплового расширения и теплоемкости в области температур ниже начала температуры сверхпроводящего перехода. Было показано [2], что для наноструктурированных образцов сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, экстремумы на температурных зависимостях этих свойств наблюдаются при одних и тех же температурах.

Для наноструктурированной керамики температурная зависимость электросопротивления от 300К до T_c оказывается линейной, в отличие от моно- и микрокристаллического YBCO, при любом уровне допирования. Причем, линейный характер сохраняется и при инверсии знака температурного коэффициента электросопротивления (ТКС). Установлено [3] так же, что ТКС линейно связан с уровнем допирования, который определяется [4] изменением содержания кислорода, что, в свою очередь, приводит к изменению объема элементарной ячейки [5]. Эти факты позволяют осуществить микроскопическую расшифровку этой связи. Показано, что возможность такой расшифровки следует из слэтеровских представлений [6] о конденсированной среде, как о системе поляризованных, взаимодействующих атомов, в которых электроны коррелировано возбуждаются при их приближении. Дополнительные дисперсионные силы [6] при этом могут привести к вырождению локализованных зарядовых состояний в такой системе и, наряду с локализованными зарядами, возникновению обобществленных зарядовых возбуждений, как и в интерметаллидах.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002 и частично проекта РФФИ № 20-32-90170

Список литературы

1. Л.Г. Мамсурова, Н.Г. Трусевич, К.С. Пигальский, С.Х. Гаджимагомедов и др. // Хим. физика, 2018, Том 37, № 9, стр. 58-66.
2. D.K. Palchae, Zh.Kh. Murlieva, M.Kh. Rabadanovetal // JofPhysics: Conf. Ser. LaPlas, 2020, Vol. 1686, p. 012051.
3. Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, М.Х. Рабадановидр. // Вестник ДГУ, 2019, Том 34, Вып. 1, стр. 24-31.
4. E.S. Božin, A. Nuq, B. Shen, H. Claus et al. // Phys. Rev. B, 2016, Vol. 11, p. 93054523.
5. R.J. Cava, A.W. Hewat, E.A. Hewatet al. // Physica C, 1990, Vol. 165, pp. 419-433.
6. Дж. Слэтер// Диэлектрики, полупроводники, металлы. – М.: Мир, 1969, 647 стр.

А.О. ПИВЕНЬ, Д.Д. ДАРМОРОЗ, Т. ОРЛОВА

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

СОЗДАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СТРУКТУР В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХИРАЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

В работе представлен метод создания разнообразных статических и динамических ориентационно-неоднородных локализованных структур в тонких пленках светочувствительных хиральных нематических жидких кристаллов путем светового индуцирования фотохимического превращения молекул хиральной органической примеси.

A.O. PIVEN, D.D. DARMOROZ, T. ORLOVA

National Research ITMO University, St. Petersburg, Russia

CREATION OF LOCALIZED TWISTED STRUCTURES IN THIN FILMS OF LIGHT-RESPONSIVE CHIRAL NEMATICS

The paper presents a method for creating a wide wealth of static and dynamic localized orientation structures in thin films of light-responsive chiral nematic liquid crystals by light induced photochemical transformations of chiral dopant molecules.

Известно, что в жидких кристаллах можно наблюдать различные ориентационные дефекты частично упорядоченного молекулярного поля. Жидкокристаллические структуры с такими дефектами обладают нетривиальными оптическими свойствами, благодаря которым находят самое разнообразное применение в оптике и фотонике. С другой стороны, такие дефекты невозможно получить непрерывным преобразованием ориентационного поля жидкого кристалла, что открывает перспективы использования структур с ориентационными дефектами для записи и хранения информации на молекулярном уровне [1].

Ранее в тонких пленках фрустрированных хиральных нематических жидких кристаллов было продемонстрировано получение различных локализованных статических дефектных структур путем оптически индуцированной переориентации жидкокристаллических молекул как структурированными, так и Гауссовыми световыми пучками [2,3]. Недавний подход, основанный на светоиндуцированном управлении длиной холестерической спирали, позволяет создавать не только различные статические структуры, но и формировать уникальные локализованные динамические структуры при помощи ультрафиолетового Гауссова пучка мощностью всего в десятки нановатт [4]. Наше исследование направлено на детальное изучение взаимосвязи между ориентационной молекулярной упаковкой и поведением светоиндуцированных локализованных супрамолекулярных структур в тонких пленках фрустрированных хиральных нематиков при варьировании пространственно-временных характеристик Гауссова светового пучка.

В нашем исследовании мы демонстрируем получение разнообразных локализованных ориентационных структур в тонких светочувствительных пленках хирального нематика при светоиндуцированном фотохимическом превращении молекул хиральной органической примеси. Сфокусированное освещение области фрустрированного хирального жидкого кристалла Гауссовым пучком приводит к локальному уменьшению длины холестерической спирали и формированию топологически сложных, статических и динамических жидкокристаллических структур. Актуальность наших исследований обусловлена интенсивными научно-техническими разработками в области перестраиваемых дифракционных и геометрических оптических элементов, ячеек оптической памяти, устройств для структурирования световых пучков [5,6], а также элементов транспортировки микро- и наночастиц [4,7].

Список литературы

1. P. J. Ackerman, R. P. Trivedi, B. Senyuk, J. Lagemaat, I.I. Smalyukh // Two-dimensional skyrmions and other solitonic structures in confinement-frustrated chiral nematics // *Physical Review E*, 2014, Vol. 90, p. 012505.
2. I.I. Smalyukh, Y. Lansac, N.A. Clark, R.P. Trivedi // Three-dimensional structure and multistable optical switching of triple-twisted particle-like excitations in anisotropic fluids // *Nature Material*, 2010, Vol. 9, pp. 139-145.
3. C. Loussert, E. Brasselet // Multiple chiral topological states in liquid crystals from unstructured light beams // *Applies Physics Letters*, 2014, Vol. 104, p. 051911.
4. T. Orlova, F. Lancia, C. Lossert, S. Lamsaard, N. Katsonis, E. Brasselet // Revolving supramolecular chiral structures powered by light in nanomotor-doped liquid crystals // *Nature Nanotechnology*, 2018, Vol. 13, pp. 304-308.
5. A.J. Hess, G. Poy, J.B. Tai, S. Zumer, I.I. Smalyukh // Control of Light by Topological Solitons in Soft Chiral Birefringent Media // *Physical Review X*, 2020, Vol. 10, p. 031042.
6. P.J. Ackerman, Z. Qi, I.I. Smalyukh // Optical generation of crystalline, quasicrystalline, and arbitrary arrays of torons in confined cholesteric liquid crystals for patterning of optical vortices in laser beams // *Physical Review E*, 2012, Vol. 86, p. 021703.
7. J.S. Evans, P.J. Ackerman, D.J. Broer, J. Lagemaat, I.I. Smalyukh // Optical generation, templating, and polymerization of three-dimensional arrays of liquid-crystal defects decorated by plasmonic nanoparticles // *Physical Review E*, 2013, Vol. 87, p. 032503.

А.Г. ПУТИЛОВ^{1,2}, А.Е. ШЕПЕЛЕВ¹, К.М. СТАНКЕВИЧ², И.И. ПРИВОДНОВ², А.А. АНТИПОВ^{1,2}

¹ИИПЛИТРАН–филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура, Россия

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

ПОЛУЧЕНИЕ МЕДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ С ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Формирование медных наночастиц осуществлялось методом лазерной абляции материала в жидкость. В качестве жидкой фазы использовали дистиллированную воду и глицерин. Излучение твердотельного лазера фокусировалось на границе раздела мишень–жидкость. Импульсная плотность мощности на мишени составляла от 33 до 52 Дж/см². Плотность синтезированных наночастиц в растворе зависела от скорости сканирования, количества проходов и мощности лазерного излучения. Исследование коллоидных растворов производилось методами динамического рассеяния света и абсорбционной спектрофотометрией. Осажденные фрактальные структуры исследовались методами атомно-силовой и электронной микроскопии, а также спектроскопией комбинационного рассеяния. Коллоидные растворы, полученные в дистиллированной воде, содержат синтезированные наночастицы меди и их окислы.

A.G. PUTILOV^{1,2}, A.ESHEPELEV¹, K.M. STANKEVICH², I.I. PRIVODNOV², A.A. ANTIPOV^{1,2}

¹ILIT RAS – Branch of FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Shatura, Russia

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

PRODUCTION OF COPPER NANOPARTICLES IN LIQUID BY HIGH-ENERGY LASER PULSES

The formation of copper nanoparticles was carried out by laser ablation of the material into a liquid. Distilled water and glycerol were used as the liquid phase. Solid-state laser radiation was focused on the target–liquid interface. The pulsed power density on the target ranged from 33 to 52 J/cm². The density of the synthesized nanoparticles in solution depended on the scanning rate, the number of passes, and the power of laser radiation. Colloidal solutions were studied by dynamic light scattering and absorption spectrophotometry. The deposited fractal structures were studied by atomic force and electron microscopy, as well as Raman spectroscopy. Colloidal solutions obtained in distilled water contain synthesized copper nanoparticles and their oxides.

Исследование синтеза наночастиц меди обусловлено их уникальными свойствами по сравнению с объемными материалами и применением в различных областях. В последнее время наночастицы меди находят применение в формировании проводящих пленок, создании нелинейных устройств и бактерицидных агентов [3]. Метод лазерной абляции имеет преимуществ в сравнении с методами химического синтеза. Данным методом синтез происходит за короткое время, образуются химически чистые вещества, также могут быть получены гибридные материалы разнородных металлов. Также синтезированные наночастицы обладают высокой активностью и практически сразу же готовы к применению [2].

Коллоидные растворы меди формировались методом лазерной абляции материала в жидкость. В жидкость: дистиллированная вода и глицерин помещалась медная мишень. Плотность энергии лазерного излучения на медной мишени составляла порядка от 33 до 52 Дж/см²[3]. Скорость сканирования не превышала 2мм/с. При лазерном воздействии на мишень с частотой 5Гц средний размер частиц составляет порядка 20нм, увеличение частоты лазерного излучения до 15Гц приводит к увеличению среднего размера частиц до 150нм. Такое увеличение связано с изменением профиля лазерного пучка, так как увеличение частоты приводит к увеличению тепловой линзы. Спектр поглощения для коллоидных растворов с синтезированными наночастицами меди находился в области ~520нм.

Дальнейшее экспериментальные исследования направлены на формирование тонких кластерных пленок. Кластерные пленки формировались на твердой диэлектрической подложке методом капельного осаждения. В первой серии эксперименты проводились в естественных условиях при температуре 25 °С. В процессе высыхания формируется кластерная тонкая пленка с четко выраженной границей и равномерно осажденными частицами в центре. Вторая серия экспериментов посвящена вынужденному испарению жидкой среды с использованием лазерного излучения. Осажденная поверхность представляет островковую пленку т.к. происходит конкуренция двух процессов диффузии наночастиц из области нагрева и гидродинамическое течение в область нагрева.

Наночастицы меди наименьшего размера синтезируются при энергии 52 Дж/см², частоте следования 5Гц и скорости сканирования 2мм/с. Увеличение частоты приводит не только к изменению профиля пучка, но и увеличению среднего размера частиц. Продемонстрировано формирование кластерных пленок в процессе естественного и вынужденного испарения жидкой фазы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90052, частично в рамках проектов РФФИ № 19-29-10022 и № 20-02-00515.

Список литературы

1. M. Fernández-Arias, et al. // Applied Surface Science, 2020, Vol. 507, p. 145032
2. A.O. Kucherik, Y.V. Ryabchikov, S.V. Kutrovskaya et al. // ChemPhysChem, 2017, Vol. 18, p. 1185.
3. A.A. Antipov, A.G. Putilov, A.V. Osipov, A.E. Shepelev, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2020, Vol. 84, p. 1359.

ВОЗМОЖНОСТЬ ДОНАСЫЩЕНИЯ КИСЛОРОДОМ МОНОДОМЕННЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ YBCO

Представлены результаты исследования стехиометрии и температурной зависимости электросопротивления монодоменного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO) до и после насыщения в среде порошка с заданным содержанием кислорода. Установлено, что соответствующая термообработка привела к изменению характера проводимости от температуры и уменьшения интервала перехода в сверхпроводящее состояние. Представлен простой способ восстановления сверхпроводящих свойств образцов YBCO после потери лабильного кислорода.

A.E. RABADANOVA, D.K. PALCHAEV, S.KH. GADZHIMAGOMEDOV, ZH.KH. MURLIEVA

Dagestan State University, Makhachkala, Russia

POSSIBILITY OF RE-OXYGENATING MONODOMAIN SUPERCONDUCTORS YBCO

The results of a study of the oxygen stoichiometry and temperature dependence of the electrical resistance of the $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO) monodomain superconductor before and after saturation in a powder medium with given oxygen content are presented. It was established that the corresponding heat treatment led to a change in the nature of conductivity with temperature and a decrease in the interval of transition to the superconducting state. A simple method for restoring the superconducting properties of YBCO samples after the loss of labile oxygen is presented.

Однодоменные сверхпроводники YBCO благодаря высокой силе левитации и высоким значениям плотности критического тока (J_c) имеют значительный потенциал в таких приложениях, как магнитные подшипники, левитирующие транспортные системы, двигатели и генераторы. Наиболее популярным для изготовления их с высокими характеристиками является метод [1-2] выращивания из расплава с верхней заправкой (TSMG).

Известно [2], что содержание кислорода и соответственно его упорядочение оказывают значительное влияние на сверхпроводящие свойства образцов YBCO. В насыщенном состоянии, при $x=7$, образец YBCO обладает орторомбической структурой и проявляет сверхпроводящие свойства с температурой перехода ~ 92 К. По мере снижения содержания кислорода до $x=6.5$ осуществляется переход к тетрагональной структуре. При этом происходит изменение также

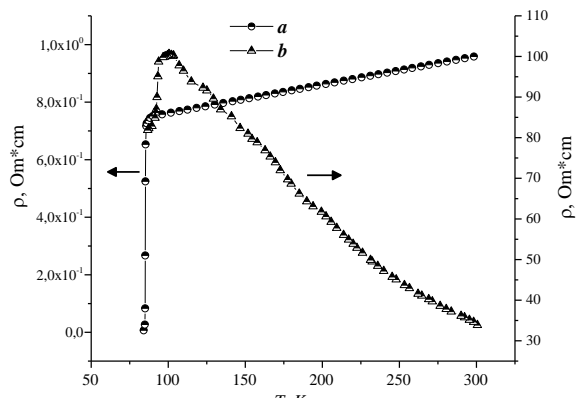


Рис.1. Температурные зависимости сопротивления до – *a* и после – *b* насыщения в микропорошке.

характера температурной зависимости сопротивления с металлического на полупроводниковый. С повышением содержания кислорода, от 6.5 до 7, возможен и обратный структурный переход. Для восстановления орторомбической структуры и улучшения сверхпроводящих свойств однодоменные образцы YBCO, полученные методом TSMG [3] с низким значением содержания кислорода, были насыщены в печи при температуре 500°C , путем их погружения в тигли оксида алюминия с микропорошком YBCO с заданным значением содержания кислорода (6.86 по данным дифракционного анализа).

На рисунке 1b приведена температурная зависимость электросопротивления образца до насыщения, которая имеет полупроводниковый характер с намеком на начало сверхпроводящего перехода при температуре ~ 93.8 К. После насыщения (рис.

1a) характер проводимости сменился на металлический с температурным коэффициентом сопротивления $\sim 0.0013\text{K}^{-1}$. При этом наблюдается значительное уменьшение ширины перехода в сверхпроводящее состояние (~ 0.4 К). Значение кислорода, оцененное из известной эмпирической зависимости [4] по температуре T_c , для насыщенного образца составляет ~ 6.80 . Это значение согласуется с содержанием кислорода в исходном порошке (~ 6.86).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-32-90170 и частично ГЗ № FZNZ-2020-0002.

Список литературы

1. N.H. Babu, C. Liu, K. Iida, D.A. Cardwell // J. Phys. Conf. Ser., 2006, Vol. 43, p. 380.
2. D. Kenfaoui, X. Chaudb, E. Louradourc, J.G. Noudema // Physics Procedia, 2012, Vol. 36, pp. 447-452.
3. V.A. Murashov, S.X. Dou, H.K. Liu et al. // Physica C, 1997, Vol. 282-287, pp. 505-506.
4. E.S. Božin, A. Huq, B. Shen, H. Claus et al. // Phys. Rev. B, 2016, Vol. 11, p. 93054523.

Х. РАХИМОВ^{1,2,3}, И. ЖУРАЕВ¹, С.М. МИРЗАЕВ¹, У. ХАЛИЛОВ¹

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Ташкент, Узбекистан

²Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце», Ташкент, Узбекистан

³Университет геологических наук, Ташкент, Узбекистан

ДИНАМИКА ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ГРАФЕНОВЫХ ДИОДАХ

Используя уравнения Дирака и Шредингера, была изучена динамика электрона в графене в присутствии асимметричного потенциала, создаваемого членом массовой анизотропии в уравнениях, которые будут использоваться для описания химического легирования материала. При таком подходе носители заряда рассматриваются как гауссовские волновые пакеты, а их динамика изучается численно путем решения как квантово-механических, так и релятивистских уравнений движения. Мы обнаружили, что время распространения волновых пакетов в зависимости от направления может различаться в 4 раза.

KH. RAKHIMOV^{1,2,3}, I. JURAEV¹, S.Z. MIRZAEV¹, U. KHALILOV¹

¹Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan

²Institute of Materials Science SPA «Physics-Sun», Tashkent, Uzbekistan

³University of Geological Sciences, Tashkent, Uzbekistan

WAVE PACKET DYNAMICS IN GRAPHENE GEOMETRY DIODES

We use the Dirac and Schrödinger equations to study the dynamics of electron in graphene in the presence of asymmetric potential created by mass-anisotropy term in the equations which will be used to describe the chemical doping of the material. In this approach, the charge carriers are described as Gaussian wave packets and their dynamics is studied numerically by solving both quantum mechanical and relativistic equations of motion. We found that the propagation time of the wave packets in the «easy» direction is up to 4 times faster than the opposite direction.

Due to its unique mechanical and electronic properties, graphene – a single layer of carbon atoms arranged in a honeycomb lattice – presents a great potential for real-life applications [1, 2]. Graphene is also a promising material for high-frequency applications due to exceptionally high carrier mobility and the ballistic nature of the charge transport [3-5]. Recently, ultra-fast geometry diodes have been created from graphene where the current rectification is provided by structural asymmetry, i.e., nanopatterning [6, 7]. The asymmetry (i.e., rectification level) in graphene geometry diodes originates from the long carrier mean-free path, whereas its planar structure gives low RC time constant required for high-frequency applications. Moreover, such devices exhibit a low impedance which is essential for efficient power transfer from antennas in the case of rectenna detectors [8]. Recent first principles calculations show the possibility of creating geometry diodes from monolayer graphene through spatial chemical functionalization (e.g., fluorination) [9]. The proposed device structures present better diode properties (i.e., larger current rectification and smaller differential resistance) as compared to the systems, where the asymmetry is created by direct structural nano-patterning. Current rectification more than one order of magnitude has been reported in the fluorinated system which cannot be achieved in nanopatterned graphene samples. These findings show the potential of chemical doping in creating effective graphene geometry diodes for practical applications.

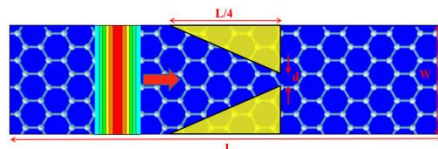


Fig. 1. Schematics of graphene geometry diode created by a doping (shaded areas).

In this thesis, we use the Dirac and Schrödinger equations to study the dynamics of charge carriers in graphene in the presence of asymmetric potential created by mass-anisotropy term in the equations (see Fig. 1) which will be used to describe the chemical doping of the material. In this approach, the charge carriers are described as Gaussian wave packets and their dynamics is studied numerically by solving both quantum mechanical and relativistic equations of motion. We found that the propagation time of the wave packets in the «easy» ratchet direction (i.e., from left to right in Fig. 1) is up to 4 times faster than the opposite direction. We have constructed a phase diagram depending on the parameters of the wave packet and the device parameters which can be effectively used in creating graphene geometry diodes for practical applications.

Список литературы

1. A. H. Castro Neto et al. // Rev. Mod. Phys., 2009, Vol. 81, p. 109.
2. K. S. Novoselov et al. // Nature, 2012, Vol. 490, p. 192.
3. L. Vicarelli et al. // Nat. Mater., 2012, Vol. 11, pp. 865-871.
4. G. Auton et al. // Nano Lett., 2017, Vol. 17, pp. 7015-7020.
5. D.A. Bandurin et al. // Nat. Comm, 2019, Vol. 9, p. 5392.
6. Z. Zhu et al. // J. Phys. D: Appl. Phys., 2013, Vol. 46, p. 185101.
7. Z. Zhu et al. // IEEE in quantum electronics, 2014, Vol. 20, p. 3801409.
8. A. Sharma et al. // Nature Nanotechnology, 2015, Vol. 10, pp. 1027-1032.
9. G.R. Berdiyev, H. Hamoudi // Comp. Mat. Sci., 2021, Vol. 188, p. 110209.

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ PEDOT:PSS НА ЕГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА

В работе представлены результаты исследования влияния модификации спиртовыми растворителями структуры полимера с дырочной проводимостью PEDOT:PSS на его электрофизические свойства. Установлено, что эффективность переноса носителей заряда полимерного солнечного элемента зависит от структурной особенности PEDOT:PSS.

K.S. ROZHKOVA, A.A. KALI, A.K. AIMUKHANOV
 Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

INFLUENCE OF PEDOT:PSS MODIFICATION ON ITS ELECTRICAL TRANSPORT PROPERTIES

The paper presents the results of a study of the effect of modification of the structure of the PEDOT:PSS polymer with hole conductivity by alcohol solvents on its electrical properties. It has been found that the efficiency of charge carrier transfer in a polymer solar cell depends on the structural features of PEDOT:PSS.

Благодаря своей высокой прозрачности в диапазоне видимого света, хорошему пленкообразованию в процессе растворения, а также высокой работе выхода, PEDOT:PSS традиционно используется в качестве дырочно-транспортного слоя в органических солнечных элементах. Свойства слоя PEDOT:PSS определенно могут оказывать влияние на производительность PSC. Его можно использовать в качестве потенциальной альтернативы как традиционным твердым электродам-подложкам, таким как проводящий электрод (ITO, FTO), так и металлическим электродам (Au, Pt, Cu и т. д.) [1].

В работе мы исследовали влияние модификации структуры PEDOT:PSS на транспорт носителей заряда в ячейках структуры ITO/PEDOT:PSS/Al с помощью метода импедансной спектроскопии. На рисунке 1 показаны спектры импеданса ячеек ITO/PEDOT:PSS/Al.

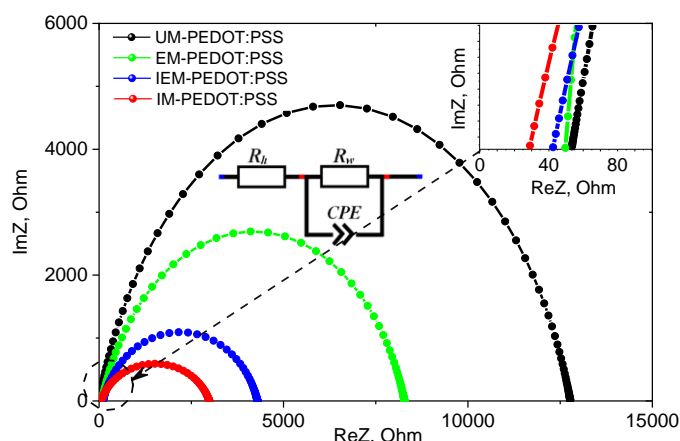


Рис. 1. Импеданс-спектры пленок PEDOT:PSS, модифицированных с-объемом спиртовых растворителей с эквивалентной электрической схемой.

Из спектров рассчитывались основные электротранспортные параметры, где: k_{eff} – параметр, характеризующий скорость извлечения носителей заряда с PEDOT:PSS, τ_{eff} – эффективное время пролета носителей заряда через PEDOT:PSS, R_h – сопротивление пленки PEDOT:PSS, R_{ext} – сопротивление переноса носителей заряда на границе PEDOT:PSS/электрод.

Таблица. Значение электрофизических параметров пленок

Образец	R_h, Ω	R_{ext}, Ω	$k_{\text{eff}}, \text{с}^{-1}$	$\tau_{\text{eff}}, \text{мс}$
UM-PEDOT:PSS (исходный, без добавления спиртов)	56.51	12772	47.86	20.89
EM-PEDOT:PSS (с этиловым спиртом)	50.45	7472.6	59.09	16.92
IEM-PEDOT:PSS (с этиловым и изопропиловым спиртами)	41.45	4817.9	78.63	12.72
IM-PEDOT:PSS (с изопропиловым спиртом)	28.11	2817.7	120.22	8.32

Исходя из данных таблицы, можно сделать вывод, что модификация PEDOT:PSS органическими растворителями оказывает существенное влияние на транспорт носителей заряда в PEDOT:PSS.

Список литературы

1. Y. Wen, J. Xu // J. Polym. Science A, 2019, Vol. 55, № 7, pp. 1121-1150.

Д.А. РОДИОНОВ, И.В. ЗАГОРОДНЕВ

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

ПЛАЗМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ДИСКЕ

В работе теоретически исследованы плазменные колебания в диске с двумерным электронным газом. Установлены зависимости положения и ширины резонансов, вызванных поглощением плазменных колебаний от параметров системы. Показано, что ширина резонансов не является простой суперпозицией столкновительного и радиационного уширения. Учтено влияние металлического затвора.

D.A. RODIONOV, I.V. ZAGORODNEV

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

PLASMON OSCILLATIONS IN DISK

In this paper, plasma oscillations in a disk with a two-dimensional electron gas are theoretically investigated. The dependences of the position and width of the resonances caused by the absorption of plasma oscillations on the parameters of the system are found. It is shown that the width is not merely a superposition of collision and radiation broadening. In addition, the behavior of plasma oscillations in the presence of a metal gate is considered.

История изучения двумерных плазменных колебаний в ограниченных структурах длится почти столетия. Относительно недавно возник особый интерес к плазменным колебаниям в таких структурах в режимах, когда проявляются эффекты, связанные с учетом электромагнитного запаздывания [1], то есть, когда длина волны внешнего возбуждающего излучения сравнима или меньше характерных размеров двумерной структуры.

В недавней работе [2] нами были подробно проанализированы плазменные колебания в проводящем диске, радиусом R , расположенном в вакууме. Плазменные колебания возбуждались внешним электромагнитным излучением. Проводимость рассматривалась в модели Друде. В таком случае систему можно описать безразмерными параметрами $\tilde{\omega} = \omega R/c$, $\tilde{\Gamma} = 2\pi n e^2 R/mc^2$, $\tilde{\gamma} = \gamma R/c$, где ω – частота внешнего излучения, c – скорость света в вакууме, n, e, m – концентрация, заряд и эффективная масса электронов соответственно. Параметр $\tilde{\Gamma}$ будем называть параметром запаздывания. Фактически это квадрат отношения частоты плазмона в бесконечной системе в квазистационарном режиме к дисперсии света в вакууме при волновом векторе $1/R$ и, скажем, при увеличении скорости света он уменьшается.

Используя уравнения Максвелла и материальные уравнения, было получено уравнение на плотность тока в диске. Оно решалось приближенно разложением тока по полному базису функций и сведением интегро-дифференциального уравнения к системе линейных уравнений на коэффициенты разложения. По найденному току вычислялась мощность джоулевых потерь. График зависимости мощности поглощения от частоты внешнего излучения имел характерные максимумы, соответствующие возбуждению плазменных колебаний с различными радиальными числами n_r в диске.

Используя одну функцию разложения, были получены аналитические выражения для ширины и положения осесимметричного ($l = 0$, $n_r = 1$) и фундаментального ($l = 1$, $n_r = 1$) резонансов при слабом электромагнитном запаздывании ($\tilde{\Gamma} \ll 1$). Оказалось, что безразмерное положение резонанса зависит только от параметра запаздывания и является монотонно растущей функцией. В тоже время оказалось, что безразмерная ширина не является просто суммой столкновительного уширения ($\tilde{\gamma}$) и радиационного уширения (пропорционального параметру запаздывания $\tilde{\Gamma}$), как это часто считалось в литературе. Было показано, что даже при небольших запаздываниях есть «интерференционный» член, за счёт которого ширина, например, может быть меньше, чем в квазистационарном режиме, то есть меньше, чем столкновительный параметр $\tilde{\gamma}$. Этот факт указывает на возможность повышения добротности наблюдаемых плазменных резонансов.

На практике часто такие структуры имеют удаленный на некоторое расстояние d от диска металлический электрод (затвор). Возникающие в таких структурах колебания можно описать с помощью метода изображений, в котором возникает параллельно второй диск, находящийся на расстоянии $2d$ от первого. В такой системе из-за наличия интерференции полей диска и его изображения положение и ширина будут осциллирующими функциями параметра $\omega d/c$.

Список литературы

1. P.A. Gusikhin, V.M. Muravev, A.A. Zagitova, I.V. Kukushkin // Phys. Rev. Lett., 2018, Vol. 121, p. 176804.
2. I.V. Zagorodnev, D.A. Rodionov, A.A. Zabolotnykh // Phys. Rev. B, 2021, Vol. 103, p. 195431.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ НАНОПЛЕНОК СУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА НА ФОТОЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВОГО ФОТОКАТОДА

Проведены экспериментальные исследования по нанесению пленок MoS_x с различной концентрацией серы на пластины p-Si измерены электрохимические свойства фотоэлектрокатада $\text{MoS}_x/\text{p-Si}$ при получении водорода в кислотном растворе. Показана важность повышения концентрации серы путем использования буферного газа (Ar) при импульсной лазерной абляции мишени MoS_2 . Под освещением ксеноновой лампы (плотность мощности 150 мВт/см^2) для пленок MoS_x , плотность тока при нулевом потенциале достигала 50 мА/см^2 , потенциал зануления тока составлял 250 мВ . Рассмотрены факторы, влияющие на стабильность характеристики сформированных фотокатодов.

O.V. RUBINKOVSKAYA, D.V. FOMINSKI, R.I. ROMANOV, V.YU. FOMINSKI

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

EFFECT OF LASER DEPOSITION CONDITIONS OF MOLYBDENUM SULFIDE NANOFILMS ON THE PHOTO-ELECTROCATALYTIC PROPERTIES OF SILICON PHOTOCATHODE

Experimental studies have been carried out on the deposition of MoS_x films with different sulfur concentrations on p-Si plates and the electrochemical properties of the $\text{MoS}_x/\text{p-Si}$ photocathode have been measured in the production of hydrogen in an acid solution. The importance of increasing the sulfur concentration by using a buffer gas (Ar) during pulsed laser ablation of the MoS_2 target is shown. Under illumination of a xenon lamp (power density 150 mW/cm^2) for $\text{MoS}_{2.2}$ films, the zero potential current density reached 50 mA/cm^2 , and the onset potential was $\sim 250 \text{ mV}$. The factors affecting the stability of the characteristics of the formed photocathodes are considered.

Получение «зеленого» водорода за счет расщепления воды под солнечным светом – это одна из наиболее сложных проблема водородной энергетики, которая требует разработки новых дешевых каталитических материалов с определенным комплексом физических и химических свойств. В работе исследована возможность применения пленок аморфного сульфида молибдена для активирования процесса выделения водорода при освещении кремниевого фотоэлектрокатада в растворе серной кислоты. Пленки MoS_x наносились методом импульсного лазерного осаждения из мишени MoS_2 . Для регулирования химического состава и морфологии пленок в камеру для осаждения в ряде случаев напускали аргон до давления 11 Па . Использование аргона позволило повысить концентрацию серы в пленках и реализовать относительно пористую структуру пленки. Толщина пленок зависела от времени осаждения и составляла $5\text{--}50 \text{ нм}$. На рис. 1 представлены результаты измерения линейных вольтамперграмм для нескольких фотоэлектрокатодов $\text{MoS}_x/\text{p-Si}$ до и после обработки в растворе плавиковой кислоты. При измерении кривых проводилось включение и выключение освещения ксеноновой лампы с плотностью мощности 150 мВт/см^2 .

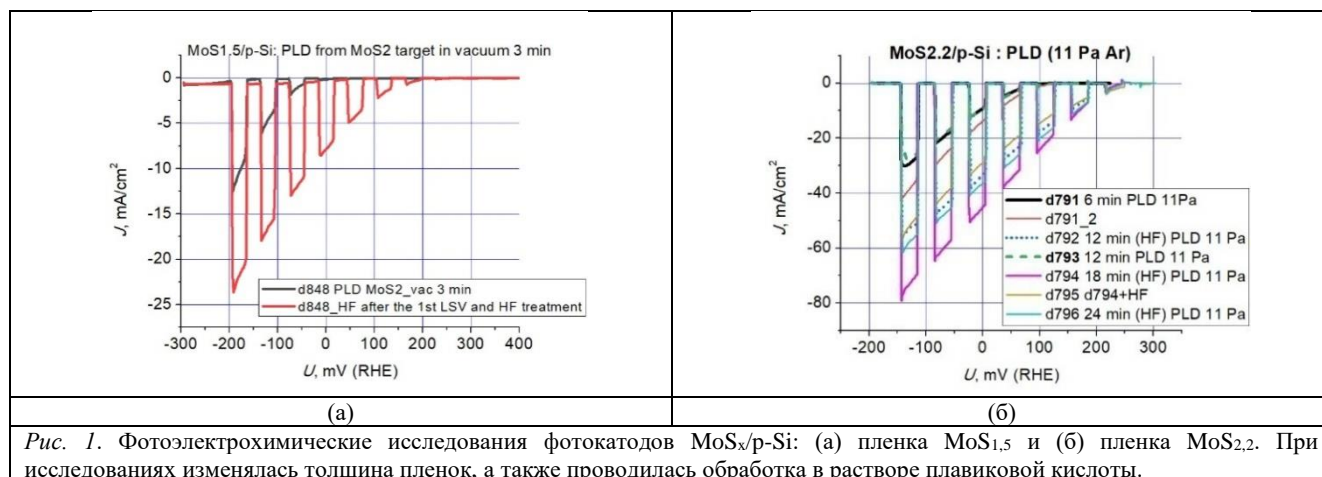


Рис. 1. Фотоэлектрохимические исследования фотокатодов $\text{MoS}_x/\text{p-Si}$: (а) пленка $\text{MoS}_{1.5}$ и (б) пленка $\text{MoS}_{2.2}$. При исследованиях изменялась толщина пленок, а также проводилась обработка в растворе плавиковой кислоты.

Видно, что обработка в HF позволяла существенно повысить эффективность выделения водорода, которая оценивалась по плотности тока при нулевом потенциале, а также учитывался потенциал зануления тока. Для выяснения причин этого явления проведены исследования химического состояния поверхности фотоэлектрокатодов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Установлено, что на стадии формирования пленки катализатора поверхность Si частично окислялась. В растворе серной кислоты добавился процесс окисления молибдена и частичное удаление димеров серы. После обработки в растворе HF концентрация оксидных фаз заметно уменьшалась.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-00081).

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ БАЗИСА В СЛОЖНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ ПИННИНГА НА МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ВТСП

Методом Монте-Карло рассчитаны петли перемагничивания и вольтамперные характеристики образцов ВТСП с различными конфигурациями дефектов (треугольная, квадратная и решетка кагоме с базисами в виде окружностей и полуокружностей), определены зависимости критического тока от внешнего магнитного поля. Показаны причины отличий в относительной эффективности разных конфигураций в сильных и слабых магнитных полях с точки зрения динамики вихревой системы.

K.N. RYKUN, A.N. MOROZ, A.N. MAKSIMOVA, V.A. KASHURNIKOV, I.A. RUDNEV

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

EFFECT OF BASIS GEOMETRY IN COMPLEX PINNING CONFIGURATIONS ON THE MAGNETIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF HTS

The magnetization reversal loops and current–voltage characteristics of HTS samples with various defect configurations (triangular, square, and kagome lattices with bases in the form of circles and semicircles) have been calculated using the Monte Carlo method, and the critical current v.s. external magnetic field dependences have been determined. The reasons behind the differences in relative efficiency of different configurations in strong and weak magnetic fields have been shown from the point of view of the dynamics of the vortex system.

Подбор геометрических параметров массивов дефектов в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) для достижения максимально эффективного пиннинга является актуальной задачей. Многочисленные исследования показали, что тип дефектов и способ их распределения по образцу существенно влияют на эффективность захвата и удержания магнитного потока, а также величину критической плотности тока j_c ВТСП [1-3].

В настоящей работе рассмотрено влияние геометрии решетки наноразмерных дефектов и связанного с ней базиса на ширину и форму петли перемагничивания слоистого ВТСП (YBCO). Методом Монте-Карло в рамках модели слоистого ВТСП [4] рассчитаны кривые намагниченности и вольтамперные характеристики нескольких образцов с различными структурами пиннинга (рис.1), содержащими примерно одинаковую среднюю концентрацию дефектов: $4.2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Определена остаточная намагниченность и зависимость j_c от внешнего магнитного поля H . Показано, что в полях до 2 кЭ наибольшую j_c имеют образцы 1 и 2 из рисунка 1. В первом случае с увеличением H критическая плотность тока резко снижается, однако в магнитных полях выше 3 кЭ обнаружен широкий ($2.8 < H < 3.8 \text{ кЭ}$) пик петли перемагничивания, свидетельствующий о локальном повышении критического тока.

В полях выше 2 кЭ наибольшую величину j_c продемонстрировали образцы 3 и 4 из рисунка 1. Анализ усредненных вихревых конфигураций показал, что подобные отличия в зависимостях для разных образцов $j_c(H)$ связаны изменениями в эффективности потенциала экранирования, вызванными разными соотношениями между характерными межвихревыми расстояниями при данном поле или токе и расстояниями между дефектами в базисе или между соседними узлами решетки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00085.

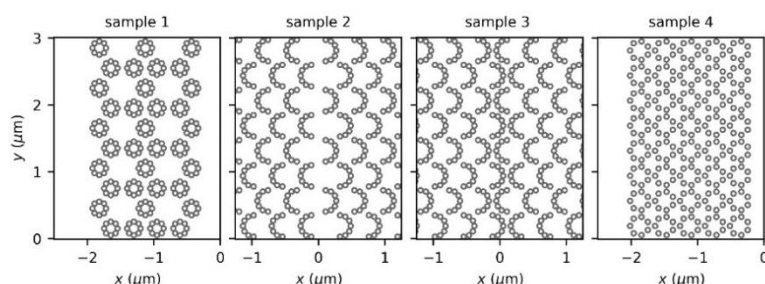


Рис. 1. Рассмотренные распределения дефектов: 1 – решетка кагоме с базисом в виде окружности, 2, 3 – треугольные решетки с базисом в виде полуокружности в разных ориентациях, 4 – квадратная решетка с базисом в виде окружности.

Список литературы

1. B. Aichner et al. // ACS Appl. Nano Mater, 2019, Vol. 2, №. 8, p. 5108.
2. A. He, C. Xue, Y.H. Zhou // AIP Adv, 2018, Vol. 8, №. 8, p. 085208.
3. A. Crisan, V.S. Dang, P. Mikheenko // Physica C, 2017, Vol. 553, p.118.
4. A.N. Moroz et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond, 2021, Vol. 32, № 4, p. 8000105.

И.Е. СЕМЕНЧУК, В.А. ЩЕРБАКОВ, А.Н. ГРЯДУНОВ

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия

ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И КОНСОЛИДАЦИЯ КЕРАМИКИ $Ta_4HfC_5-HfB_2$ С СУБМИКРОННОЙ СТРУКТУРОЙ

В работе представлены результаты экспериментального исследования по получению ультратугоплавкого композита $Ta_4HfC_5-HfB_2$ методом электротеплового взрыва под давлением. Исследовано влияние механической активации на микроструктуру и фазовый состав получаемого продукта. Изучена термостойкость композита при нагреве в пламени кислородно-ацетиленовой горелки.

I.E. SEMENCHUK, V.A. SCHERBAKOV, A.N. GRYADUNOV

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Chernogolovka, Russia

EXOTHERMAL SYNTHESIS AND CONSOLIDATION OF $Ta_4HfC_5-HfB_2$ CERAMICS WITH A SUBMICRON STRUCTURE

The paper presents the results of an experimental study on production of the $Ta_4HfC_5-HfB_2$ ultra-high-melting composite by electro-thermal explosion (ETE) under pressure. The effect of mechanical activation on the microstructure and phase composition of the resulting product was investigated. The heat resistance of composites was searched at heating in the flame of an oxygen-acetylene burner.

Карбиды металлов IV–VI групп Периодической системы являются тугоплавкими соединениями, образующими непрерывный ряд твердых растворов, что обусловлено одинаковой сингонией и близкими параметрами кристаллических решеток. Эти соединения обладают уникальными физико-механическими характеристиками и являются перспективными для использования в аэрокосмической, ядерной, металлообрабатывающей промышленности, катализе и др. В ИСМАН разработан эффективный метод получения таких композитов, сочетающий экзотермический синтез в режиме электротеплового взрыва (ЭТВ) и консолидацию горячего продукта в условиях квазиизостатического сжатия. Лабораторная установка для осуществления синтеза ЭТВ описана в [1].

Представлены результаты по получению ультратугоплавкого композита $Ta_4HfC_5-HfB_2$ с субмикронной структурой методом электротеплового взрыва (ЭТВ) под давлением. Изучено влияние длительности механической активации смеси порошков Ta, Hf, C и B в гексане на характеристики реакционной смеси порошков и формирование фазового состава керамического композита $Ta_4HfC_5-HfB_2$. Показано, что оптимальным условием приготовления реакционной смеси является двухстадийная механическая активация, в которой на первой стадии производится активированное смешение порошков тантала и гафния в течение 5-90 мин, на второй – к полученной смеси активированных металлических порошков добавляли сажу и смешивали в течение четырех минут. Показано, что в ходе активированного смешивания разрушились кристаллические структуры металлических частиц и образовались зародыши новой фазы в виде твердого раствора карбидов тантала и гафния. После активированного смешивания проводили экзотермический синтез в режиме ЭТВ под давлением. Полученные образцы изучали с помощью растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

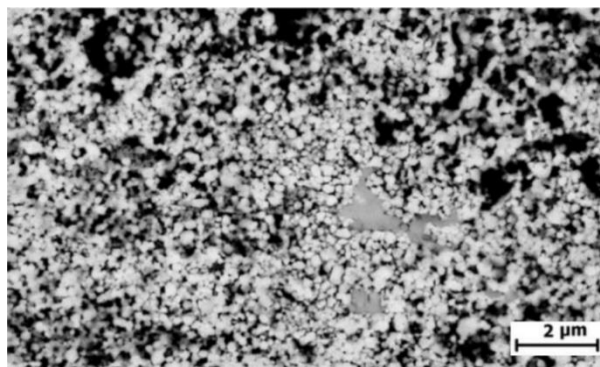


Рис. 1. Микроструктура конечного продукта.

На рисунке 1 представлена микроструктура полученного композита. Видно, что размер зерен составляет 0,1-0,5 мкм, остаточная пористость полученного композита составляет менее 10%.

Таким образом, впервые реализован синтез ультратугоплавкого композита $Ta_4HfC_5-HfB_2$ методом электротеплового взрыва под давлением.

Список литературы

1. В.А. Щербаков, А.В. Щербаков, С.А. Бостанджиян // Физика горения и взрыва, 2019, № 1, стр. 83–91.

С.А. СЕРОПЯН, И.В. САЙКОВ, Г.Р. САЙКОВА, Е.И. ВОЛЧЕНКО

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ W-ПТФЭ-AL

Исследовано влияние механической активации на параметры воспламенения, горения и ударно-волнового инициирования порошковой смеси W-ПТФЭ-Al. Установлено, что кратковременная механическая активация позволяет повысить реакционную способность исследуемой системы, в результате чего снижается температура воспламенения и повышается чувствительность к ударно-волновому нагружению. Таким образом, применение механической активации является перспективной технологией для повышения реакционной способности существующих высокоплотных реакционных материалов.

S.A. SEROPYAN, I.V. SAIKOV, G.R. SAIKOVA, E.I. VOLCHENKO

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION ON THE REACTIVION OF THE W-PTFE-AI SYSTEM

The effect of mechanical activation on the parameters of ignition, combustion, and shock-wave initiation of a W-PTFE-Al powder mixture were studied. It has been established that short-term mechanical activation makes it possible to increase the reaction of the system under study, as a result of which the ignition temperature decreases and sensitivity to shock-wave loading increases. Thus, the use of mechanical activation is a promising technology for increasing the reaction of existing high-density reactive materials

Реакционные материалы (РМ) представляют собой смесь порошков металлов, неметаллов и фторполимеров, которые инертны в нормальных условиях, но способные к интенсивной экзотермической реакции при сильном механическом или тепловом воздействии [1].

Объектами исследований были смеси из порошков вольфрама марки ПВ2, политетрафторэтилена (ПТФЭ) марки Флуралит и алюминия марки АСД-1 в различных соотношениях. При помощи термодинамических расчетов выбраны оптимальные составы, исходя из адиабатической температуры горения ($T_{ад}$) и доли конденсированных продуктов, № 1 – 76% W-19%ПТФЭ-5% Al ($T_{ад}=2777^{\circ}\text{C}$, 0,76); № 2 – 72% W-18%ПТФЭ-10% Al ($T_{ад}=2859^{\circ}\text{C}$, 0,76); № 3 – 64% W-16%ПТФЭ-20% Al ($T_{ад}=1658^{\circ}\text{C}$, 0,71); № 4 – 56% W-16%ПТФЭ-30% Al ($T_{ад}=1385^{\circ}\text{C}$, 0,75). Цель работы заключалась в определении влияния механической активации на параметры воспламенения, горения и ударно-волнового инициирования порошковой смеси W-ПТФЭ-Al.

Механическая активация проводилась в механоактиваторе АГО-2 со скоростью 2200 об/мин в течение 2 мин в гексане при соотношении массы металлических шаров к массе порошка 10:1. Воспламенение проводилось на цилиндрических образцах диаметром 3 мм и высотой 1,5 мм, которые размещались на термопаре ВР5/20 толщиной 50 мкм в тигле из нитрида бора и при помощи графитовой пластинки нагревались со скоростью 60-80 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ для реализации условий теплового взрыва, по методике, описанной в работе [2]. Скорость горения измерялась при помощи термопар (база измерений 15мм) и видеосъемки на образцах в виде параллелепипеда размерами 5x5x20 мм в среде аргона и воздуха при давлении 10^5 Па и разряжении 10^2 Па. Способность к ударно-волновому инициированию проводилась путем метания стального ударника на матрицу с образцами диаметром 10 мм и высотой 10 мм по методике, описанной в работе [3].

В экспериментах по определению температуры воспламенению установлено, что в результате нагрева образуются полочки плавления ПТФЭ (330-350 $^{\circ}\text{C}$) и Al (630-670 $^{\circ}\text{C}$). Механическая активация снизила температуру воспламенения с 800-900 $^{\circ}\text{C}$ до 630-670 $^{\circ}\text{C}$ для всех составов. Наибольшая интенсивность реакции зафиксирована в составах № 1 и 2, а наименьшая – в составе № 4. Скорость горения в аргоне и на воздухе составила не более 2; 3,6; 4; 3,3 мм/с, а в вакууме значительно ниже: 0,1; 0,7; 0,6; 0,8 мм/с соответственно. Температура горения составов составила 1800; 2000; 1800; 1600 $^{\circ}\text{C}$. Механическая активация позволила инициировать самоподдерживающийся режим горения в составе № 1 и ударно-волновой синтез в составах № 1 и 3, тогда как без механической активации они не инициировались. Также в результате ударно-волнового синтеза произошло вздутие стальной метаемой пластины толщиной 3 мм продуктами реакции. На основе РФА установлено, что основными продуктами реакции были W_2C , Al_4W и AlF_3 . Сувеличением содержания алюминия в продуктах преобладает Al_4W , а доля W_2C снижается. В результате механической активации удалось снизить температуру воспламенения и повысить чувствительность к ударно-волновому нагружению реакционных материалов. Таким образом, применение механической активации является перспективной технологией для повышения реакционной способности существующих высокоплотных реакционных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00640-А.

Список литературы

1. E. Tang, Z. Sun, Y. Han and others// Results Phys., 2021, Vol. 31, p. 105019.
2. I.V. Saikov, S.A. Seropyan, A.Yu. Malakhov and others // Metals, 2021, Vol. 11, № 9, p. 1355.
3. M.I. Alymov, S.G. Vadchenko, I.S. Gordopolova and others// Inorg. Mater, 2018, Vol. 54, № 11, pp. 1175-1182.

Н.Н. СИТНИКОВ^{1,2}, И.А. ЗАЛЕТОВА¹, А.В. ШЕЛЯКОВ²

¹АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА БЫСТРОЗАКАЛЁННЫХ СЛОИСТЫХ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ ИЗ СПЛАВА $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$

Показано, что электроимпульсная термообработка быстрозакалённых аморфно-кристаллических сплавов $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (ат. %) посредством пропускания через образец импульса электрического тока длительностью менее 1 секунды приводит к формированию структуры, кардинально отличающейся от структуры после изотермической термообработки. Микроструктура сплавов в поперечном сечении характеризуется неоднородным распределением кристаллов по толщине ленты: вблизи поверхностей ленты формируются столбчатые кристаллы, а в объеме ленты присутствуют единичные или сгруппированные крупные кристаллы. Некоторые столбчатые кристаллы соприкасаются по центру ленты с формированием однородной границы.

N.N. SITNIKOV^{1,2}, I.A. ZALETOVA¹, A.V. SHELYAKOV²

¹SSC «Keldysh Research Center», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

ELECTRIC PULSE HEAT TREATMENT OF RAPID-QUENCHED LAMINATED AMORPHOUS-CRYSTALLINE RIBBONS PRODUCED OF $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ALLOY

It is shown that electropulse heat treatment of rapidly quenched amorphous-crystalline $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ alloys (at. %) by passing an electric current pulse with duration of less than 1 second through the sample leads to the formation of a structure radically different from the structure after isothermal heat treatment. The microstructure of alloys in cross-section is characterized by an inhomogeneous distribution of crystals along the thickness of the ribbon: columnar crystals form near the tape surfaces, and single or grouped large crystals are present in the volume of the ribbon. Some columnar crystals touch in the center of the ribbon to form a homogeneous border.

В работе методом быстрой закалки расплава на вращающемся диске (планарное литьё) при скорости охлаждения около 10^6 К/с были получены слоистые аморфно-кристаллические ленты из сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (ат. %). Ленты подвергали термообработке в калориметре, изотермической обработке (ИТО) в муфельной печи (в течение 300 с) и электроимпульсной термообработке (ЭИТО) длительностью от 5 с до 1 мс. Исследование микроструктуры лент проводили с использованием методов металлографии (изготовление поперечных шлифов и травление) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Процессы роста кристаллической фазы из аморфной части ленты были изучены с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при скорости нагрева $5^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Из полученных ДСК-кривых была определена температура пика кристаллизации, величина которой составляла 443.7°C . Отмечено, что передний фронт пика выделения тепла, ответственного за кристаллизационные процессы, более растянут по сравнению с образцами аморфных лент (без поверхностного кристаллического слоя). При температуре около 430°C (меньшей, чем температура кристаллизации аморфной части ленты) поверхностный кристаллический слой испытывает рекристаллизацию и начинает расти вглубь аморфной части ленты. Повышение температуры приводит к началу процессов расстеклования аморфной части ленты. На рис. 1 показаны СЭМ-изображения поперечного сечения ленты в исходном состоянии и после обработки.

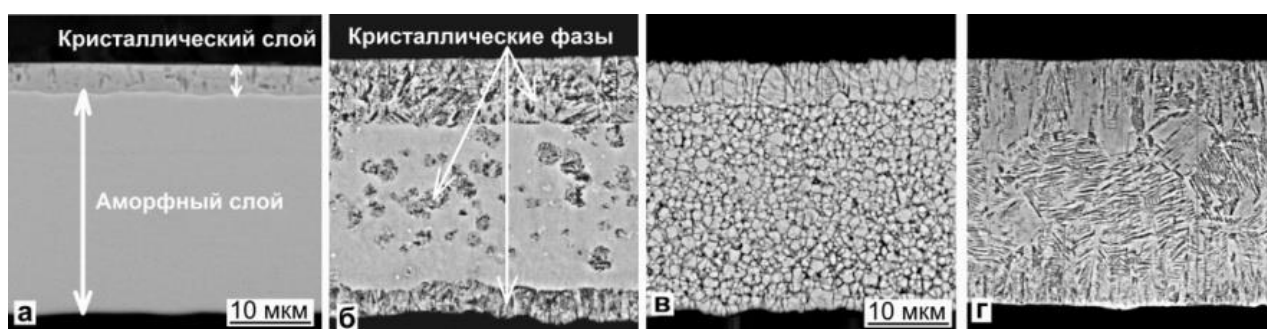


Рис. 1. Поперечное сечение образцов лент в исходном состоянии (а) и после обработки: в калориметре до $T=435^\circ\text{C}$ (б); после ИТО при $T=470^\circ\text{C}$ (в); после ЭИТО с длительностью импульса 10 мс (г).

Поперечное сечение ленты после нагрева в калориметре до температуры 445°C (рис. 1б) характеризуется наличием поверхностных кристаллических фаз и аморфной фазы в средней части ленты, в которой присутствуют отдельные кристаллиты. ИТО при температуре 470°C формирует в лентах биморфную кристаллическую структуру (рис. 1в). ЭИТО с временем воздействия менее 1 секунды приводит к значительному изменению формируемой кристаллической структуры по сравнению со структурой, полученной при ИТО. Микроструктура лент после ЭИТО характеризуется неравномерным распределением кристаллов по толщине ленты: во внутренней части ленты присутствуют крупные кристаллы, а от поверхности ленты уходят вглубь столбчатые кристаллы (рис. 1г).

Работа выполнена при поддержке гранта № 19-12-00327 Российского научного фонда.

О ВОЗМОЖНОСТИ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГО-ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА

Представлена теоретическая основа нового бесконтактного метода измерения толщины углеродных пленок (в том числе пленок легких элементов: бериллий, литий и т.д.) с использованием энерго-дисперсионного анализа поверхности. Методика сравнивается с известными ЭДС-методами измерения толщины тонких пленок. Возможности и пределы применимости ЭДС для определения толщины тонких углеродных пленок качественно определены методом численного моделирования методом Монте-Карло характеристических рентгеновских спектров.

I.A. SOROKIN, D.V. KOLODKO

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch), Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia

ON THE POSSIBILITY OF INDIRECT MEASUREMENT OF THE THIN CARBON FILMS THICKNESS USING ENERGY-DISPERSIVE ANALYSIS

The theoretical feasibility of a technique for indirect measurement of the thin carbon film thickness using energy dispersive x-ray spectroscopy was presented. The technique was compared with a well-known method based on measuring the characteristic substrate material radiation. The possibilities and limits of applicability of the energy dispersive spectroscopy for the thickness determination of thin carbon films were qualitatively determined by Monte Carlo numerical simulation method of characteristic x-ray spectra.

В работе описаны возможные подходы по определению толщины графитовой пленки бесконтактным методом с помощью ЭДС. На примере графитовой пленки, на кремнии исследован известный подход с референсной подложкой. Методом Монте-Карло вычислены и построены калибровочные кривые величины $I(\text{Si})/I(\text{Si})_{\text{ref}}$ для дальнейшего определения диапазона измеримых толщин пленок. Для энергий электронного пучка от 5 до 30 кэВ он составил от 10 нм до 10 мкм.

Предложена модификация ЭДС метода с использованием тонкой укрывной пленки из золота для определения толщины графита [1]. Также численным методом построены калибровочные кривые зависимости величины $I(\text{Si})/I(\text{Au})$ от толщины пленки графита. Диапазон измеряемых толщин графитовой пленки совпадает с диапазоном для метода референсной подложки (10 нм-10 мкм). При этом модифицированная методика не требует наличия стандартных образцов материала подложки и дополнительного его анализа, что уменьшает систематическую погрешность измерения ЭДС. Также, при наличии в используемом СЭМ распылительной системы для создания тонких проводящих пленок на образцах, измерения морфологии и состава/профилей толщин пленки могут проводиться за одну загрузку вакуумной камеры СЭМ. В качестве примера на рисунке 1 представлен диапазон измеряемых толщин графита на кремнии с использованием укрывного слоя из золота.

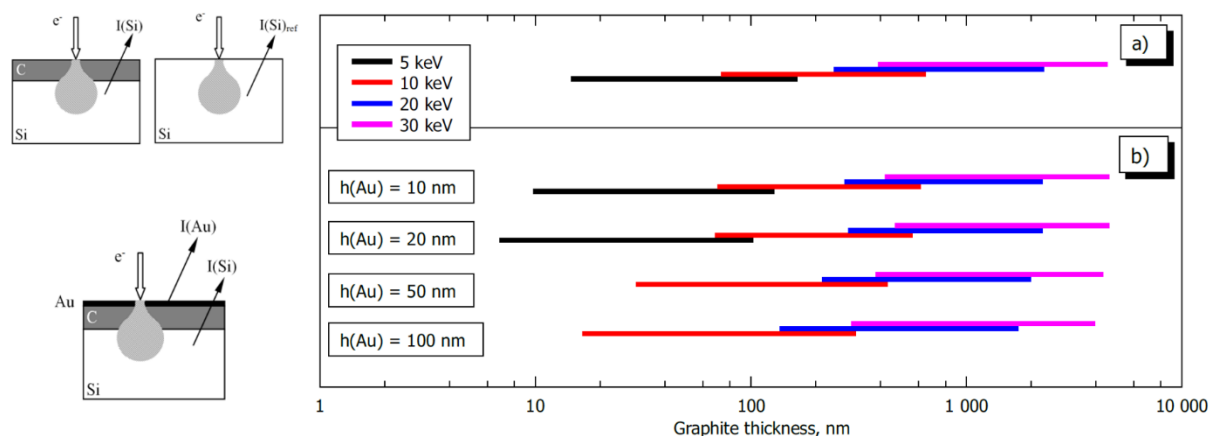


Рис. 1. Диаграмма применимости ЭДС метода измерения толщины графитовых пленок на кремнии с референсными подложкой (а) и укрывным слоем.

Рассмотренный подход применим для бесконтактного измерения толщин пленок материалов плохо детектируемых методом ЭДС (углерод, литий, бериллий и т.д.).

Список литературы

1. I.A. Sorokin, D.V. Kolodko // On the possibility of indirect measurement of the thin carbon films thickness using energy-dispersive analysis // Thin Solid Films, 2021, Vol. 737, p. 138937.

В.Г. СРЕДИН², К.С.АНДРЕЙЧИКОВ³, В.П. АСТАХОВ³, В.Ф. ЧИШКО³, Р.Ш. РАМАКОТИ¹,
А.П. МЕЛЕХОВ¹, А.А. МАКАРОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха, Россия

³АО «МЗ «САПФИР» Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АНТИМОНИДА ИНДИЯ С АНОДНЫМ ОКИСНЫМ СЛОЕМ

Рассмотрено влияние мягкого рентгеновского излучения лазерной вакуумной искры на ВФХ МДП-структур InSb с анодным окисным слоем. Показано, что воздействие МРИ уменьшает модуляцию ВФХ при возрастании дозы облучения. Стойкость этого эффекта к прогреву также пропорциональна дозе облучения.

V.G. SREDIN², K.S.ANDREICHNIKOV³, V.P.ASTAKHOV³, V.F.CHISHKO³, R.S.RAMAKOTI¹,
A.P.MELEKHOV¹, A.A.MAKAROV¹

¹National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

²Military Academy of the Strategic Missile Forces Peter the Great, Balashikha, Russia

³JSC MH SAPPHIRE, Moscow, Russia

EFFECT OF SOFT X-RAY RADIATION ON THE CAPACITOR-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF MIS STRUCTURES BASED ON INDIUM ANTIMONIDE WITH AN ANODIC OXIDE LAYER

The influence of soft X-ray radiation of a laser vacuum spark on the CV characteristics of InSb MIS structures with an anodic oxide layer is considered. It has been shown that the effect of MRI reduces the modulation of the CV characteristics with an increase in the irradiation dose. The resistance of this effect to heating is also proportional to the radiation dose.

Известно, что при распаде электронных возмущений, вызванных поглощением рентгеновского излучения, в полупроводниковых материалах могут генерироваться точечные дефекты. Энергии кванта мягкого рентгеновского излучения (диапазон 0,4 – 10 кэВ) достаточно для возбуждения электронов L, M, N оболочек ионного остова кристаллов полупроводников [1]. Взаимодействие мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с атомами кристаллов носит локальный характер: квант излучения поглощается отдельным атомом, который может быть расположен как в узле кристаллической решетки, так и в междоузлии. При этом может произойти генерация точечного дефекта кристаллической решетки [2]. В [3] было показано, что МРИ, генерируемое лазерной вакуумной искрой, приводит к созданию поверхностных дефектов в монокристаллах и эпитаксиальных слоях твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ и приводит к модификации поверхностных свойств этого материала. В настоящей работе рассмотрено влияние МРИ на свойства границы раздела другого узкозонного полупроводника InSb с анодным окислом.

В экспериментах были использованы пластины InSb с ориентацией плоскости поверхности (100) и (211). Для формирования слоя анодного окисла (АО) использовался электролит на основе сульфида натрия Na₂S. АО были выращены по базовой технологии в гальваностатическом режиме при плотности тока $j = 0,05$ мА/см². На поверхности кристалла термическим способом через маску были осаждены золотые контакты, диаметр отверстий в маске ~1 мм. Половина площади полученных структур подвергалась обработке МРИ лазерной плазмы вакуумной искры по методике работы [3]. Другая половина была контрольной и облучению не подвергалась. Измерения ВФХ структур проводились при 77К в темноте. Отмечено, что в результате облучения изменился цвет диэлектрика, что свидетельствует об изменении его структуры и соответствует изменению величины S_{max} .

Отмечено также, что увеличение дозы облучения D приводит к уменьшению глубины модуляции C-V характеристики. При дозе $D \approx 300$ мЗв C-V характеристика полностью теряет модуляцию ($C = const$ во всем диапазоне тестирующих напряжений). Последующий длительный (~ сутки) прогрев таких образцов при $T = 80$ °С модуляцию не восстановил.

При меньших дозах облучения $D \leq 150$ мЗв модуляция частично сохраняется в тем большей мере, чем меньше доза, а последующий прогрев возвращает модуляцию к виду, бывшему до облучения, также в тем большей мере, чем меньше была доза облучения.

Таким образом показано, что обработка МДП-структур на основе InSb с АО воздействием МРИ вносит в АО и граничные области InSb радиационные дефекты, экранирующие электрическое поле, проникающее в InSb при измерении C-V характеристик. При «малых» дозах $D \leq 75$ мЗв дефекты могут полностью аннигилировать при прогревах, а при больших дозах возрастает их стойкость к прогревам пропорционально дозе облучения.

Список литературы

1. http://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html
2. В.С. Вавилов // УФН, 1997, том 167, №4, стр.407- 412.
3. В.Г. Средин, А.В. Войцеховский, О.Б. Ананьин, А.П. Мелехов, С.Н. Несмелов, С.М. Дзядух // Прикладная физика, 2018, №4, стр.54-60.
4. В.П. Астахов, В.Ф. Дудкин, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, О.В. Смолин, И.И. Таубкин // Микроэлектроника, 1989, том 18, № 5.
5. V.G. Sredin, O.G. Lanskaaya, V.M. Popovnin // *Semiconductors*, 1996, Vol. 30, № 3, pp. 215-216.

Д.А. СТАРОДУБЦЕВА

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И СПИНОВОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАНАРНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

Рассмотрена динамика электронных волновых пакетов в таких наноструктурах, как графен и системы со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашба. Проанализирована эволюция псевдospина электрона, выявлены сходства и различия пространственной и спиновой динамики электрона в таких системах. Продемонстрированы фундаментальные эффекты, присущие данным системам, проанализирован их механизм возникновения.

D.A. STARODUBTSEVA

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

FEATURES OF SPATIAL AND SPIN ELECTRON DYNAMICS IN PLANAR NANOSTRUCTURES

The dynamics of electron wave packets in such nanostructures as graphene and systems with spin-orbit interaction of the Rashba type is considered. The evolution of electron pseudospin is analyzed, the similarities and differences in spatial-spin dynamics of electrons in such systems are revealed. The fundamental effects inherent in these systems are demonstrated, and their mechanisms are analyzed.

Исследование твердотельных наноструктур и поведения зарядовых носителей в них является одним из важных и интересных направлений в современной физике [1]. В таких системах возникают новые физические эффекты, обусловленные наноразмерным масштабом, имеющие перспективные практические приложения.

Графен – двумерный материал, состоящий из атомов углерода – является одной из самых активно развивающихся основ для нанoeлектроники [2]. Его исключительные свойства позволяют, как решать прикладные задачи, так и изучать фундаментальные эффекты. Как следствие, появляется необходимость уметь описывать динамику зарядовых носителей в графене при различных условиях, чтобы уметь ею управлять. Еще одним перспективным направлением является анализ систем со спин-орбитальным (СО) взаимодействием типа Рашба, используемых в спинтронике и позволяющих управлять спинами частиц без приложения внешнего магнитного поля. И графен, и системы с СО взаимодействием Рашбы имеют общую особенность в виде перепутанности пространственных и спиновых степеней свободы, однако различаются общим видом гамильтониана [3].

Гамильтониан энергетический спектр для графена имеет вид:

$$H = v_F(\vec{p}\vec{\sigma})$$
$$E = \pm v_F|\vec{p}|$$

Отсюда видно, что энергия имеет две ветви – положительную и отрицательную, что при определенных условиях становится причиной нетривиальной динамики формирующегося электронного волнового пакета.

Гамильтониан и энергетический спектр для системы с СО Рашбы имеет похожее по структуре слагаемое:

$$H = \frac{p^2}{2m} - \alpha(p_x\sigma_y - p_y\sigma_x)$$
$$E = \frac{p^2}{2m} \pm \alpha|\vec{p}|$$

В ходе исследования обнаружены различные режимы динамики электронных волновых пакетов в таких структурах. Были выявлены особенности поведения пакетов для каждой из систем, найдены сходства и различия. Продемонстрировано перепутывание пространственных и спиновых степеней свободы электрона друг на друга и его превалирующее влияние на пространственную динамику электрона. Продемонстрировано «дрожание» и последующее затухание средних значений координат центра масс электронного волнового пакета и дано физическое обоснование наблюдаемого явления, неоднократно вызывающего противоречивые дискуссии в литературе. В случае систем с взаимодействием типа Рашба продемонстрирована возможность управления электронным волновым пакетом, включая возможное удержание центра масс пакета при ненулевом среднем импульсе, а также движение в противоположную сторону от заданного импульса.

Помимо этого, было получено точное аналитическое решение уравнений Гейзенберга для эволюции операторов координат и спина электрона, раскрывающее физические механизмы наблюдаемых эффектов. Рассмотрены различные типы электронных волновых пакетов и выявлены особенности их динамики.

Список литературы

1. O. Klein // *Z. Phys.*, 1929, Vol. 53, pp. 157–1165.
2. Г.М. Максимова, В.А. Бурдов // *Квантовая механика графена*, 2019.
3. Д.В. Хомицкий // *Наноструктуры. Математическая физика и моделирование*, 2009, том 1, № 1, стр. 83-113.

Триботехнические свойства ионно-плазменных покрытий в системе Mo-(Hf, Zr, Y)-Si-B

Покрытия Mo-(Hf,Zr,Y)-Si-B были получены с помощью метода магнетронного распыления при постоянном токе с применением мозаичных мишеней. Изучены состав и структура, исследованы коэффициент трения, износостойкость, стойкость к ударно-динамическому нагружению и абразивному износу. Исследовано влияние концентраций добавок Zr,Hf и Y на свойства покрытия Mo-Si-B.

A.D. SYTCHENKO, Ph.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV, R.A. VAKHRUSHEV, E.A. LEVASHOV
National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF ION-PLASMA Mo-(Hf, Zr, Y)-Si-B COATINGS

Mo-(Hf, Zr, Y)-Si-B coatings were obtained by magnetron sputtering at direct current using mosaic targets. The composition and structure, the coefficient of friction, wear resistance, resistance to shock-dynamic loading, and abrasive wear were investigated. The influence of Zr, Hf, and Y additives concentrations on the properties of the Mo-Si-B coating has been studied.

Одним из направлений современного материаловедения является создание жаростойких покрытий для повышения срока службы и рабочих характеристик узлов и деталей, работающих в условиях высоких температур. Одними из наиболее эффективных считаются покрытия в системе Mo-Si-B [1,2]. В работе [3] были получены композиционные покрытия на основе Mo-Si-B, которые сохраняли защитные свойства в среде ионизированного воздуха при температуре 1800-2100°C в течение 100 с. Покрытия Mo-Si-B с высоким содержанием кремния обладали высокой жаростойкостью до 1700°C при выдержке 10 мин [4]. Большинство исследований направлено на изучение высокотемпературной стойкости. В то время как, работ, посвященных исследованию трибологических характеристик покрытий на основе Mo-Si-B крайне мало. Настоящая работа направлена на изучение структуры и триботехнических характеристик, в том числе износо- и эрозийной стойкости, покрытий в системе Mo-(Hf, Zr, Y)-Si-B.

Покрытия Mo-Si-B, Mo-Hf-Si-B, Mo-Zr-Si-B и Mo-Y-Si-B были получены методом магнетронного распыления в режиме постоянного тока с помощью мозаичных мишеней, содержащих сегменты Hf, Zr и Y. Керамическая мишень MoSiB диаметром 120 мм и толщиной 10 мм была изготовлена методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Эксперименты по нанесению покрытий в режиме DCMS проводили в атмосфере Ar (99,9995%) на вакуумной установке УВН-2М с помощью модуля питания PinnaclePlus. В качестве материала подложки использовались пластины из Al₂O₃. Структурные исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) выполняли на микроскопе «Hitachi» S-3400N, оснащенном прибором NORAN 7 Thermo. Испытания по определению коэффициента трения покрытий проводили на трибометре CSM Instruments (Швейцария) по схеме «стержень-диск» при нагрузке 1 Н. Стойкость к ударно-динамическому воздействию исследовали с помощью прибора Impact Tester Ceme Con при частоте 50 Гц и количестве ударов 10⁵. Нагрузка при этом составляла 1000 Н. Для определения параметров и дорожек износа использовали оптический профилометр WYKO-NT1100. Исследование эрозийной стойкости покрытий проводили на ультразвуковом диспергаторе УЗДН-2Т. В качестве абразивного материала использовали SiO₂, WC, Si₃N₄, Al₂O₃ и В₄C.

Согласно данным ЭДС, концентрация основных элементов Mo, Si, В в покрытиях снижалась при введении легирующих элементов. Содержание Hf, Zr и Y возрастало с увеличением площади сегментов в мозаичной мишени. По данным СЭМ, нелегированные покрытия обладали столбчатой структурой. Увеличение концентрации добавок привело к снижению размера зерна и подавлению столбчатого роста. Введение добавок Hf, Zr и Y в базовое покрытие Mo-Si-B привело к снижению механических характеристик. Трибологические испытания показали, что все образцы характеризовались относительно высоким коэффициентом трения (f) на уровне 0,7-0,8. Однако стойкость к ударно-динамическому нагружению возрастала при введении Hf, Zr и Y. Лучшую стойкость показало покрытие Mo-Zr-Si-B. Согласно результатам эрозийных испытаний, максимальную потерю массы при абразивном воздействии SiO₂, равную 4,7 мг, показало покрытие Mo-Si-B. Лучшими показателями абразивной стойкости к SiO₂ обладало покрытие Mo-Hf-Si-B (Δm=2,2 мг).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00117).

Список литературы

1. J.H. Perepezko // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, Vol. 71, pp. 246-254.
2. P. Ritt, R. Sakidja, J.H. Perepezko // Surf. Coat. Technol, 2012, Vol. 206, pp. 4166-4172.
3. B.E. Zhestkov, V.S. Terent'eva // Russ. Metall, 2010, Vol. 2010, pp. 33-40.
4. P.V. Kiryukhantsev-Korneev, I.V. Iatsyuk, N.V. Shvindina, E.A. Levashov, D.V. Shtansky // Corros. Sci., 2017, Vol. 123, pp. 319-327.

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ SPIRO-OMETADA НА ЕЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

В данной работе методом spin-coating были получены ETL пленки Spiro-OMeTADa. Пленки Spiro-OMeTADa наносились методом spin-coating при различных оборотах вращения центрифуги. С помощью атомно-силового микроскопа исследовались топография поверхности и толщина пленок Spiro-OMeTADa. Исследованы оптические свойства пленок Spiro-OMeTADa различной толщиной. По спектрам поглощения была проведена оценка ширины запрещенной зоны.

S.K. TAZHIBAYEV, T.M. MUKHAMETKALI, D.S. KAMBAR, A.K. ZEINIDENOV

Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

EFFECT OF SPIRO-OMETADA FILM THICKNESS ON ITS OPTICAL PROPERTIES

In this work, Spiro-OMeTAD ETL films were obtained by spin-coating. Spiro-OMeTAD films were applied by the spin-coating method at different revolutions of the centrifuge. The topography of the surface and the thickness of Spiro-OMeTAD films were studied using an atomic force microscope. Optical properties of Spiro-OMeTAD films with different thicknesses have been investigated. The absorption spectra were used to estimate the band gap width.

Перовскитные солнечные ячейки конструировались на стеклянных подложках, покрытых тонким проводящим слоем FTO (15 Ом/см²), выполняющих функцию внешнего электрода (катода) [1]. На поверхность подложки с FTO методом spin-coating из раствора наносилась пленка Spiro-OMeTAD, при оборотах вращения 2000, 3000, 4000, 5000 и 6000 rpm.

Регистрация спектров поглощения исследуемых образцов осуществлялась на спектрометре AvaSpec-ULS2048CL-EVO (Avantes). В качестве зондирующего излучения использовался комбинированный дейтериево-галогеновый источник света AvaLight-DHc (Avantes) с рабочим диапазоном 200-2500 нм.

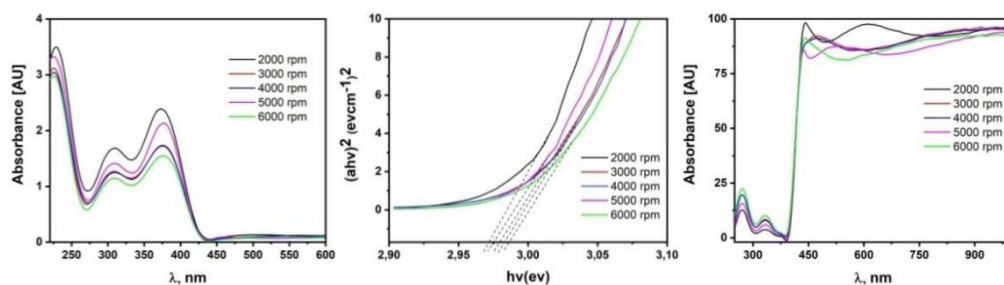


Рис. 1. Спектры поглощения (а), ширина запрещенной зоны (б) и пропускания (с) пленок Spiro-OMeTADa с различной толщиной

На рисунке 1а приведены спектров поглощения ETL слоя Spiro-OMeTADa. По краю спектров поглощения проводилась оценка ширины запрещенной зоны. Оценка ширины запрещенной зоны пленок Spiro-OMeTADa была проведена методом Таус Plot (Рисунок 1б). Спектры пропускания пленок с различной толщиной показаны на рисунке 1с. При увеличении толщины пленок значение коэффициента пропускания уменьшается до 77 %. Оптические характеристики пленок Spiro-OMeTAD представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оптические характеристики транспортного слоя Spiro-OMeTADa при разных значениях толщины

Thickness, rpm	D ₁ , A.U. (λ=228 nm)	D ₂ , A.U. (λ=308 nm)	D ₃ , A.U. (λ=373 nm)	Bandgap, eV	Transmittance (%)
2000	3.49	1.68	2.39	2,972	98,2
3000	3.13	1.27	1.74	2,979	92,4
4000	3.03	1.23	1.72	2,983	91,2
5000	3.32	1.41	2.13	2,975	85,7
6000	2.96	1.14	1.55	2,986	91,4

Список литературы

1. J.Y. Seo, S. Akin, M. Zalibera, M.A. R.Preciado, H. S.Kim, S.M.Zakeeruddin, J.V.Milić, M. Grätzel // Dopant Engineering for Spiro-OMeTAD Hole-Transporting Materials towards Efficient Perovskite Solar Cells // Adv. Funct. Mater, 2021, Vol. 31, p. 2102124.
2. L. Yang, B. Xu, D. Bi, H. Tian, G. Boschloo, L. Sun, A. Hagfeldt, E.M. Johansson // Initial Light Soaking Treatment Enables Hole Transport Material to Outperform Spiro-OMeTAD in Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells // J. Am. Chem. Soc., 2013, Vol. 135, pp. 7378-7385.

МЕТОД МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ РЕЗОНАНСНОГО ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ, КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ

Методом масс-спектрометрии отрицательных ионов резонансного захвата медленных (0-15 эВ) электронов исследованы молекулы кумарина. Анализ каналов распада молекулярных отрицательных ионов (ОИ) на стабильные фрагменты с использованием результатов квантово-химических расчетов в приближении теории функционала плотности позволил определить наиболее вероятные структуры осколочных ионов. Экспериментально измерено среднее время жизни молекулярных ОИ относительно автоотщепления электрона и сродство к электрону для данного соединения.

M.M. TAYUPOV, A.V. MARKOVA, A.M. SAFRONOV, K.YU. POGLAZOV

Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

THE METHOD OF RESONANT ELECTRON ATTACHMENT MASS SPECTROMETRY AS A TOOL FOR THE STUDY OF ELECTROACTIVE ORGANIC MOLECULES

Coumarin molecules were studied using the method of negative ion mass spectrometry of resonant attachment of slow (0-15 eV) electrons. The analysis of the decay channels of molecular negative ions (NI) into stable fragments with the results of quantum chemical calculations in the approximation of the density functional theory allowed us to determine the most probable structures of fragment ions. We conducted experiments measuring the average lifetime of molecular NI relative to electron auto-cleavage and electron affinity for the given compound

Как показывают последние тенденции, в мировой науке вырос интерес к экспериментальным и теоретическим исследованиям фундаментальных квантовых эффектов, возникающих в изолированных молекулярных системах при захвате медленных (0-15 эВ) электронов по резонансным механизмам (резонанс формы, колебательный резонанс Фешбаха, электронно-возбужденный резонанс). К таким эффектам в первую очередь относятся перегруппировочные процессы (изомеризация) и возбуждение внутренних вращений в отрицательных молекулярных ионах, содержащих большой запас, до нескольких электронвольт, избыточной внутренней энергии. Релаксация первичного электронно-возбужденного состояния отрицательного иона обычно происходит путем безызлучательных переходов без изменения спина (внутренняя конверсия), что сопровождается перераспределением избыточной энергии по колебательным и вращательным степеням свободы. В качестве объектов исследования, обычно, выбирают молекулы, обладающие выраженными электрон-акцепторными свойствами и моделирующие активные структуры проводящих полимерных материалов (например, производные фталида [1]), обладающие внутренними вращениями (например, молекулы триклозана [2]), а также такие, строение которых допускает возможность внутримолекулярного разрыва ковалентной связи (например, производные кумарина [3]), включая органические полупроводники (производные перилен- и нафтален-тетракарбокисильныхдиангидридов [4]), перспективные в быстро развивающихся областях молекулярной электроники и фотоники. Ранее, с помощью метода масс-спектрометрии резонансного захвата электронов, было показано, что переход полимерных пленок, содержащих в себе элементы фталида, в высокопроводящее состояние, связан с тенденцией мономерного соединения к раскрытию пятичленного цикла с разрывом связи С–О через переходное состояние, лежащее в области энергии 0.65 эВ [5]. Дальнейшее же изучение изомеров фталида показало, что такой процесс является уникальным [6].

В представленной работе были исследованы молекулы кумарина, в которых изучалась возможность образования молекулярных ОИ по сходному со фталидом механизму, но при раскрыти шестичленного цикла. Как показал эксперимент и квантово-химические расчеты, молекулы кумарина образовывали молекулярные ОИ при тепловых энергиях с сохранением исходной конформации. Экспериментально было определено время жизни молекулярных ОИ (около 29 пс). В рамках приближения Аррениуса была оценена величина адиабатического сродства к электрону (ЕАа), которая составила 1.17 эВ. Установлено, что теоретические значения ЕАа, вычисленные методом B3LYP/6-31+G(d) с минимальными добавлением диффузных функций, как разность полных энергий нейтральной молекулы и анион радикала, неплохо коррелируют с величинами ЕАа, полученными из эксперимента.

Список литературы

1. Асфандиаров Н. Л., Пшеничнюк С. А., Рахмеев Р. Г., Лачинов А. Н., Крайкин В. А. // Журнал технической физики, 2018, Том 88, № 7, стр. 1085-1090.
2. S. A. Pshenichnyuk et al. // Physical Review Research, 2020, Vol. 2, № 1, p. 012030.
3. М.М. Таюпов, Р.Г. Рахмеев, Н.Л. Асфандиаров, С.А. Пшеничнюк // Математическая физика и компьютерное моделирование, 2020, том 23, № 3.
4. А. С. Комолов и др. // Физика твердого тела, 2018, том 60, № 4, стр. 799-804.
5. N.L. Asfandiarov, S.A. Pshenichnyuk, A.S. Vorob'ev, E.P. Nafikova, A.N. Lachinov, V.A. Kraikin, A. Modelli // J. Chem. Phys., 2015, Vol. 142, p. 174308.
6. А.М. Сафронов и др. // Математическая физика и компьютерное моделирование, 2021, Том 24, № 4, стр. 67-78.

Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, А.Н. УРОКОВ,
Ж. ШЕРМАТОВ, М. ЭРКАБОЕВ
Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, Ташкент, Узбекистан

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ В ПРОЦЕССЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Ba^{+}

В работе с использованием методов оже-электронной спектроскопии, ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопией поглощения света исследовано влияние имплантации ионов Ba^{+} и последующего отжига на состав силикатного стекла.

D.A. TASHMUKHAMEDOVA, B.E. UMIRZAKOV, M.B. YUSUPJANOVA, A.N. UROKOV,
J. SHERMATOV, M. ERKABOEV
Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan

CHANGES IN THE COMPOSITION OF SILICATE GLASS BY IMPLANTATION OF Ba^{+} IONS

In this work, using the methods of Auger electron spectroscopy, ultraviolet photoelectron spectroscopy, and light absorption spectroscopy, we studied the effect of implantation of Ba^{+} ions and subsequent annealing on the composition of silicate glass.

Импантация проводилась ионами Ba^{+} с энергиями от 0.5 до 5 keV при дозе насыщения $D = D_{sat.} = (6 - 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Источником бария служили таблетки титаната бария ($BaTi$). При нагревании кварцевой трубочки, заполненной таблетками $BaTi$, образуются пары бария, часть которых, попадая на поверхность раскаленной вольфрамовой спирали, ионизируется.

Перед ионной имплантацией силикатное стекло (СС) обезгаживалось прогревом при $T = 1000 \text{ K}$ в течение 2 – 3 часов, при вакууме 10^{-6} Па . На рисунке приведены оже – спектр поверхности хорошо обезгаженного СС и СС, имплантированного ионами Ba^{+} с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ при дозе $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до и после прогрева при $T = 900 \text{ K}$ в течении 40 мин. Видно, что в спектре СС в основном обнаруживаются интенсивные пики SiO_2 , PbO . Кроме этих элементов обнаруживаются малоинтенсивные пики Mn , Cu и Mg , общая концентрация которых не превышает 2 – 3 ат. %.

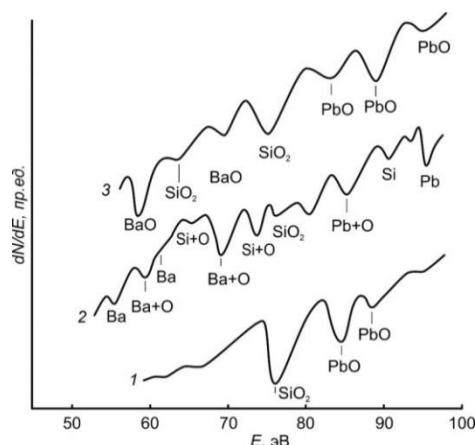


Рис.1. Оже-спектры: 1 – хорошо обезгаженного силикатного стекла; 2 – после имплантации ионами Ba^{+} с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ при $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 3 – после прогрева ионно-имплантированного СС при $T = 1000 \text{ K}$.

При бомбардировке ионами Ba^{+} с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ резко изменяется состав и структура поверхности (рис. 1, кривая 2). При этом концентрация Ba на поверхности составляет $\sim 40 - 45 \text{ ат. \%}$, основная часть из них ($\sim 80 - 85 \text{ \%}$) образуют соединения с кислородом, т.е. происходит резкое изменение состава поверхности [1,2]. В частности, интенсивности оже – пиков SiO_2 и PbO резко уменьшаются, появляются пики, характерные для нестехиометрического $Pb + O$, $Si + O$ и $Ba + O$, а также пики для несвязанных атомов Pb , Si и Ba . После прогрева при $T = 1000 \text{ K}$ оже – пики, связанные с атомами Ba , Si и Pb , исчезают и появляются интенсивные пики SiO_2 , PbO и BaO .

Список литературы

1. Ё.С. Эргашов, Д.А. Ташмухамедова, Э. Раббимов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 4, стр. 38.
2. Д.А. Ташмухамедова, М.Б. Юсупжанова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2016, № 12, стр. 89.

С.Ф. УМАНСКАЯ, М.А. ШЕВЧЕНКО, А.Д. КУДРЯВЦЕВА, М.А. КАРПОВ, Н.В. ЧЕРНЕГА,
А.Н. МАРЕСЕВ, К.И. ЗЕМСКОВ

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

ГЕНЕРАЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ТРИБОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Представлены результаты исследования процесса генерации электромагнитного излучения при ударно индуцированной триболюминесценции образцов монокристаллического кварца, ниобата лития и полиметилметакрилата. Показана корреляция момента начала механического разрушения образцов с интенсивным излучением широкополосного СВЧ излучения из них. Измерены частотные характеристики излучения широкополосной антенной. Механизм генерации излучения объясняется появлением в образцах трещин с последующей трибоэлектрификацией осколков образцов и автоэлектронной эмиссией с их поверхности за счет образования высокого градиента электрической напряженности поля.

S.F. UMANSKAYA, M.A. SHEVCHENKO, A.D. KUDRYAVTSEVA, M.A. KARPOV,
N.V. TCHERNIEGA, A.N. MARESEV, K.I. ZEMSKOV

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

GENERATION OF BROADBAND ELECTROMAGNETIC EMISSION AT IMPACT-INDUCED TRIBOLUMINESCENCE OF DIELECTRICS

The results of studying the process of electromagnetic radiation generation during shock-induced triboluminescence of monocrystalline quartz, lithium niobate, and polymethyl methacrylate samples are presented. The correlation of the moment of the beginning of mechanical destruction of samples with intense radiation of broadband microwave radiation from them is shown. The frequency characteristics of microwave radiation from a broadband antenna have been measured. The radiation generation mechanism is explained by the appearance of cracks in the samples, followed by triboelectrification of sample fragments and field emission from their surface due to the formation of a high gradient of the electric field strength.

Явление электротриболюминесценции в диэлектриках и возникновение электрических зарядов на их поверхности, сопровождающее данный эффект, достаточно давно известно [1]. Установлены некоторые зависимости характеристик триболюминесценции от кристаллографической ориентации кристалла [2]. Многие авторы связывают явление свечения в оптическом и рентгеновском диапазонах с эмиссией с поверхности диэлектрика свободных электронов высоких энергий вследствие появления на границе разрушения электрических полей высокой напряженности [3]. Ранее нами было показано, что механоакустические колебания среды могут вызывать в ней генерацию высокочастотного электромагнитного излучения [4]. В настоящей работе нами исследованы характеристики высокочастотного электромагнитного излучения, возникающего при ударном воздействии на образцы нескольких типов диэлектриков. Исследования проводились в вакуумной камере методом механического нагружения образцов ударником, толкаемым детонирующей газовой смесью. Синхронно с ударным нагружением образцов регистрировались: давление в образцах пристыкованным к их поверхности пьезодатчиком, динамика свечения трещин в образцах в оптическом диапазоне методом фотохронографии, а также амплитудно-частотные и временные параметры СВЧ излучения из образцов широкополосной антенной, подключенной к широкополосному осциллографу.

Результаты исследований показывают, что скорость распространения трещин в образцах совпадает со скоростью звука в них при достижении критического давления разрушения, при этом эмиссия оптического излучения из трещин имеет мерцающий во времени, модулированный характер с периодом единицы нс. Синхронно с оптическим излучением из распространяющихся трещин в образцах происходит эмиссия ЭМИ излучения, по частоте и амплитуде коррелирующая с оптическим мерцанием. Измерены электрические заряды, возникающие в образцах при их разрушении эмиссионный ток с их поверхности, также по форме, частоте и амплитуде коррелирующий с оптическим и радиочастотным сигналами.

Полученные результаты позволяют предположить, что явление триболюминесценции при механическом разрушении диэлектрических кристаллов связано с возникновением на откольной границе плотного потока свободных электронов, высокого градиента напряженности электрического поля, а механизм излучения связан с торможением электронов в среде и электрическим пробоем на границах развивающейся трещины.

Список литературы

4. B.P. Chandra // Kinetics of triboluminescence in crystals // J. Phys. D: Appl. Phys., 1977, Vol. 10.
5. K. Wang et al. // Triboluminescence dominated by crystallographic orientation // Sci. Rep., 2016, Vol. 6, p. 26324.
6. D. Olawale, O.I. Okoli, R. Fontenot, W. Hollerman // Triboluminescence: Theory, synthesis, and application, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-38842-7
7. M.A. Shevchenko, M.A. Karpov, A.D. Kudryavtseva et al. // Electromagnetic microwave generation by acoustic vibrations gives rise to nanoradiophotonics // Sci Rep., 2021, Vol. 11, p. 7682.

Б.Е. УМИРЗАКОВ², Г.Х. АЛЛАЯРОВА¹, Б. ХУРРАМОВ¹
¹Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан
²Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ SI ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ O₂⁺

Методом имплантации ионов O₂⁺ в Si получены наноразмерные пленки SiO₂ с толщиной 30-90Å и изучены их состав, морфология поверхности, эмиссионные и оптические свойства. Однако в этой работе и других работах практически не были исследованы закономерности и механизмы формирования нанопленок SiO₂ и не изучено также изменение плотности состояния валентных электронов при имплантации ионов O₂⁺ в Si и последующего отжига.

B.E. UMIRZAKOV, G.H. ALLAYAROVA, B. HURRAMOV
¹Qarshi Davlat Universiteti, Qarshit, Uzbekistan
²Tashkent state technical university named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan

STUDY OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF SI SURFACE LAYERS DURING IMPLANTATION OF O₂⁺ IONS

Nanosized SiO₂ films with a thickness of 30-90Å have been obtained by the method of implantation of O₂⁺ ions in Si, and their composition, surface morphology, emission and optical properties have been studied. However, in this work and other works, the regularities and mechanisms of the formation of SiO₂ nanofilms were practically not studied, and the change in the density of state of valence electrons upon implantation of O₂⁺ ions in Si and subsequent annealing was also not studied.

На рис. приведены изменения по глубине общей концентрации O, и концентрации O образующих связи типа SiO₂ и SiO_x (SiO + SiO_{0.5}) для Si, имплантированного ионами O₂⁺ с E₀ = 1 кэВ при D=6·10¹⁶см⁻². Максимальная концентрация O, содержащегося на поверхности ионно-имплантированного Si, принята за 100 ат%

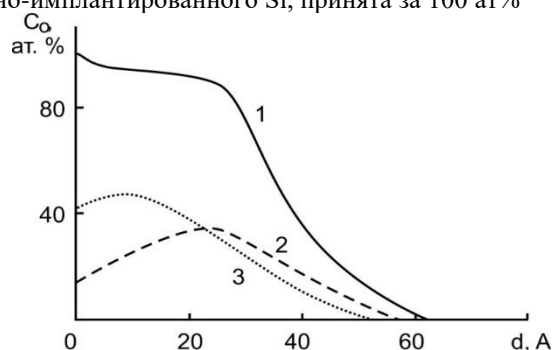


Рис.1. Зависимости C_O(d) для Si, имплантированного ионами O₂⁺ с E₀=1 кэВ.

1.-Общая концентрация атомов O; 2 - концентрация O в оксиде SiO₂; 3 - концентрация O в соединении SiO_x(SiO + SiO_{0.5}).%

Видно, что кривые зависимости C_{SiO_x}(d) и C_{SiO_x}(d) проходят через максимум. В поверхностных слоях Si ~ 80-85 ат% кислорода входят в химическую связь с атомами Si. После прогрева при T=900K все атомы O и Si входят в химическую связь и образуется пленки SiO₂ с достаточно хорошей стехиометрией [2].

Список литературы

1. M.B. Yusupzhanova, D.A. Tashmukhamedova // Composition Morphology and Electronic structure of the Nanophases Created on the SiO₂ Surface by Ar⁺ Ion Bombardment// Technical Physics, 2016, Vol.86, No. 4, pp. 148.
2. B. E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, G.H. Allayarova, Zh.Sh. Sodikzhanov //The Effect of the Formation of Silicides on the Resistivity of Silicon // Technical Physics Letters, 2019, Vol. 45, No. 4, pp. 356–358.

Б.Е. УМИРЗАКОВ², З.А. ИСАХАНОВ¹, Р.М. ЁРКУЛОВ¹, Ж.Ш. СОДИКЖАНОВ¹,
А.Ш. УСМОНКУЛОВ¹, А.С. ХАЛМАТОВ¹

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Ташкент, Узбекистан
²Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ, КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ БАРИЯ

В работе исследовано влияние разупорядоченных приповерхностных слоев и дефектообразования, созданной имплантацией ионов Ba⁺ в кремнии р-типа. Показано, что низкоэнергетическая имплантация Ba в Si с большими дозами образует слой с большим концентрационным напряжением. Концентрационное напряжение приводит к увеличению потенциального барьера и, следовательно, к уменьшению коэффициента диффузии.

B.E. UMIRZAKOV², Z.A. ISAKHANOV¹, R.M. YORKULOV¹, J.SH. SODIKJANOV¹,
A.SH. USMONKULOV¹, A.S. HALMATOV¹

¹Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan
²Tashkent State Technical University, University, Tashkent, Uzbekistan

STUDY OF THE EFFECT OF DEFECTS WHICH WERE FORMED TO THE ELECTRONIC AND CRYSTAL STRUCTURE OF SILICON IMPLANTED WITH BARIUM IONS

In this work, the influence of disordered near-surface layers and formed defects created by the implantation of Ba⁺ ions to the electronic and crystal structure of p-type silicon was studied. It is shown that low-energy implantation of Ba into Si at high doses forms a layer with a high concentration voltage. The concentration voltage led to an increase in the potential barrier and, consequently, to a decrease in the diffusion coefficient.

При имплантации ионов Ba⁺ в Si происходил разупорядочение приповерхностных слоев, при этом степень образования силицидов Ba не высокая и свойства ионно-имплантированных слоев определяется разупорядочением поверхности. Неупорядоченность решетки приводит не только к изменению положение максимумов плотности электронных состояний валентной зоны полупроводников, но и к появлению локальных уровней в запрещенной зоне. Пока количество дефектов невелико электроны на этих уровнях “чувствуют” поле одного примесного центра. При возрастании концентрации (N) примеси, когда расстояние между ними $x^{-1/3}$ становится меньше дебаевского радиуса экранирования, электрон “чувствуют” поле нескольких случайно расположенных дефектов. При дальнейшем возрастании N, когда расстояние между ними становится меньше боровского радиуса электрона (с учетом диэлектрической проницаемости полупроводника), нарастает перекрытие волновых функций электронов, центрированных на разных атомах примеси. Оба эти эффекта приводят к уширению примесных уровней в зоне. В сильнолегированном полупроводнике эта примесная зона перекрывается с зоной проводимости. Все эти явления можно наблюдать при легировании кремния р-типа ионами бария. Пока доза имплантации мала, уровень Ферми находится в запрещенной зоне, и сдвинут в сторону потолка валентной зоны. Поскольку имплантируемые атомы не только создают примесные рассеивающие центры, но и являются донорами электронов. При больших дозах имплантации образуется сильно легированный полупроводник с примесной зоной, сливающейся с зоной проводимости. Электронные состояния в примесной зоне носят локализованный характер, однако это обстоятельство не сказывается существенно на вероятности поглощения света электронами. Поэтому к описанию фотоэмиссии электронов из примесной зоны применим тот же подход, что и к электронам валентных зон.

При отжиге силицида бария (хаотически распределенные) избыточные слабо связанные атомы Ba диффундирует вглубь кристалла и примесная зона исчезает. При низкоэнергетической имплантации Ba в Si с большими дозами образуется слой с большим концентрационным напряжением. Релаксация этого напряжения возможна при повышении температуры, когда вследствие диффузии избыточной примеси, а также возможной структурной перестройки, средний объем, приходящийся на каждый атом, будет соответствовать равновесному состоянию для данной фазы. Концентрационное напряжение приводит к уменьшению среднего межатомного расстояния по сравнению с тем, которое соответствует фазе BaSi или BaSi₂. Это, в свою очередь, вызывает увеличение потенциального барьера, который преодолевает диффундирующий атом при каждом скачке.

Последняя равна разности потенциальных энергий взаимодействия атома с окружающими соседями в двух положениях: равновесного тетраэдрического междоузлия и при минимальных расстояниях между соседними атомами (в алмазной решетке это соответствует положению в центре тройки атомов образующих грань элементарного тетраэдра решетки). Таким образом, концентрационные напряжения приводят к увеличению высоты потенциального барьера и, следовательно, к уменьшению коэффициента диффузии. Этим объясняется образование запорного поверхностного слоя, препятствующего проникновению кислорода и никеля в Si, легированным барием с большими дозами.

Б.Е. УМИРЗАКОВ, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, З.А. ТУРСУНМЕТОВА,
С.Т. АБРАЕВА, Ш. ШАМСИЕВ

Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, Ташкент, Узбекистан

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОННЫХ ПУЧКОВ Ar^+ НА СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ GaAs

Настоящая работа посвящена изучению влияния бомбардировки ионами Ar^+ на состав поверхности GaAs и зависимости этих изменений от угла падения ионов.

B.E. UMIRZAKOV, D.A. TASHMUKHAMEDOVA, M.B. YUSUPJANOVA, Z.A. TURSUNMETOVA,
S.T. ABRAEVA, SH. SHAMSIEV

Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan

EFFECT OF THE ANGLE OF INCIDENT OF LOW-ENERGY Ar^+ ION BEAMS ON THE COMPOSITION OF THE GaAs SURFACE

This work is devoted to studying the effect of bombardment with Ar^+ ions on the composition of the GaAs surface and the dependence of these changes on the angle of incidence of ions.

При бомбардировке многокомпонентных материалов, в частности бинарных материалов ионами Ar^+ разупорядочение сопровождается разложением материалов на составляющие и резкому изменению состава, электронной структуры [1,2]. Эти изменения зависят от энергии, дозы и угла падения ионов Ar^+ . Поэтому данная работа посвящена изучению влияния бомбардировки ионами Ar^+ на состав поверхности GaAs и зависимости этих изменений от угла падения ионов. Для уменьшения изменения концентрации поверхностных атомов Ga и As, а также толщины разупорядоченных слоев и температуры постимплантационного отжига бомбардировку Ar^+ проводили при различных углах падения Ar^+ . На рисунке приведены зависимости C_{As} от дозы ионов Ar^+ с $E_0 = 1$ кэВ при различных углах падения на поверхность. Видно, что с ростом φ положение максимума C_{As} смещается в сторону малых доз и его концентрация значительно снижается. Доза, при которой значение C_{As} стабилизируется, также уменьшается. При $\varphi = 72^\circ$ начиная с $D = 10^{15}$ cm^{-2} поверхность полностью разупорядочивается, C_C равняется нулю, а C_{As} практически не меняется и составляет ~ 48 ат.%, а C_{Ga} устанавливается на уровне 52 ат.% т.е. при этой φ Ga и As распыляются с поверхности приблизительно одинаково. После прогрева при $T = 750$ К в течении 10 – 15 мин полностью восстанавливается монокристаллическая структура GaAs. При этом $C_{Ga} = 48$ ат.%, $C_{As} = 51$ ат.%, $C_C = 1$ ат.%, $C_O = 0$ ат.%. Такая концентрация атомов не изменяется до глубины 10 – 15 Å. Результаты ОЭС показали, что часть ($\sim 60 - 70$ ат.%) атомов Ga и As вновь образовали соединения типа GaAs.

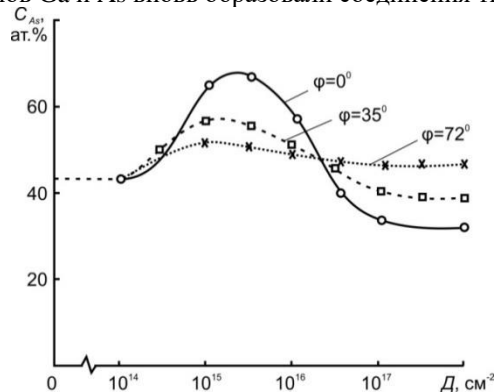


Рис.1. Зависимость C_{As} от дозы ионов Ar^+ с $E_0 = 1$ кэВ при разных углах падения на поверхность относительно нормали к поверхности.

Таким образом при бомбардировке GaAs ионами Ar^+ с $E_0 = 1$ кэВ под углом $\varphi \sim 72^\circ$ поверхность максимально очищается от примесных атомов уже при $T = 750$ К. Такие же исследования проводились и для предварительно не очищенного GaAs. При этом в ходе получения сверхвысокого вакуума образец подвергался прогреву при $T = 600$ К в течение 3-4 часов. И в этом случае максимальная очистка поверхности наблюдается при $\varphi = 72^\circ$. Однако температуру прогрева необходимо было увеличить до 850 К, а время прогрева до 30-40 мин.

Список литературы

1. Ё.С. Эргашов, Д.А. Ташмухамедова, Ф.Г. Джурабекова, Б.Е. Умирзаков//Известия РАН. Сер. Физ., 2016, Том 80, № 2, стр. 162.
2. М.Б.Юсупжанова, Д.А.Ташмухамедова, Б.Е.Умирзаков// Журнал Технической Физики, 2016, Том 86, № 4, стр. 148.

А.В. УШАКОВ^{1,2}, И.В. КАРПОВ^{1,2}, Л.Ю. ФЕДОРОВ^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,
Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ НАНОЧАСТИЦ NiO

Рассмотрено влияние скорости плазменной закалки при синтезе нанопорошка NiO в плазме дугового разряда низкого давления. В работе она выражается через давление газовой смеси. Показано, что, влияние на диэлектрическую проницаемость, в свою очередь, обусловлено процессами в плазме прикатодной области.

A.V. USHAKOV^{1,2}, I.V. KARPOV^{1,2}, L.Yu. FEDOROV^{1,2}

¹Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

EFFECT OF THE PLASMA HARDENING RATE ON THE DIELECTRIC CONSTANT OF NiO NANOPARTICLES

The influence of the plasma hardening rate during the synthesis of NiO nanopowder in a low-pressure arc discharge plasma is considered. In work, it is expressed in terms of the pressure of the gas mixture. It is shown that, in turn, the effect on the permittivity is due to processes in the plasma near the cathode.

Синтез наночастиц с использованием плазмы вакуумно-дугового разряда является эффективным методом управления их фазовым составом, морфологией, а также придания специфических свойств. В настоящей работе в результате испарения никелевого катода в аргон-кислородной плазме дугового разряда низкого давления образуются монофазные наночастицы NiO со средним размером 18 нм. При давлении газовой смеси в плазмохимическом реакторе составляющем 180 Па образуется практически стехиометрический оксид состава Ni₄₈O₅₂.

На рис. 1 приведены вычисленные частотные зависимости действительной и мнимой компоненты диэлектрической проницаемости (ДП) и тангенса угла потерь. На высоких частотах ($8 \cdot 10^4$ - 10^8) действительная компонента ДП меняется незначительно (5.3-3.1), в отличие от мнимой (14.36-0.3). На низких частотах обе компоненты возрастают до гигантских значений ($\sim 5 \cdot 10^5$), при этом они слабо отличаются друг от друга и $\text{tg}(\delta)$ равен 1. По мере увеличения частоты $\text{tg}(\delta)$ резко возрастает и достигает максимума (7.5) при 40 kHz, а затем падает почти до 0. Такое поведение ДП можно объяснить только накоплением зарядов вблизи электродов, вследствие ионной проводимости и образованием двойного электрического слоя. Ионная проводимость обусловлена гидратированными ионами (протонная проводимость) или появлением кислородной проводимости, вследствие большой концентрации кислородных вакансий в наночастицах. Стехиометрический NiO при комнатной температуре представляет собой изолятор Мотта-Хаббарда [1], проводимость которого связана с вакансиями ионов Ni²⁺ или O²⁻. Для таких материалов характерна прыжковая или эстафетная проводимость, когда две соседние вакансии Ni²⁺ превращаются в Ni³⁺ в зависимости от концентрации дефектов и приложенного электрического поля.

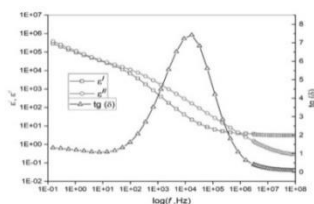


Рис. 1. Частотные зависимости и тангенс угла потерь образца NiO.

Показанные особенности поведения ДП можно связать с процессами, протекающими в плазме прикатодной области. Как уже было показано в работе [2], демонстрирующей связь размера и остаточных напряжений синтезируемых наночастиц от условий синтеза. В процессе закалки плазменные струи, эмитированные катодным пятном, тормозятся буферным газом (аргон), в результате чего он разогревается и повышается электронная температура плазмы катодного пятна. Происходит уменьшение размера частиц микрокапельной фракции вплоть до ее полного исчезновения, ускоряются процессы плазмохимического синтеза. Скорость закалки зависит от скорости диффузии ионов в плазменной струе и сечения упругого столкновения. Наночастицы синтезированные при повышенном давлении (180 Па) формируются из смеси кластеров, ионов, пара и атомов кислорода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00021).

Список литературы

1. N.F. Mott // Proceedings of the Physical Society, Series A, 1949. Vol. 62, № 7, p. 416.
2. I.V. Karpov, A.V. Ushakov, V.G. Demin, Shaihadinov A.A., A.I. Demchenko et. al. // JMMM, 2019, Vol. 490, p. 165492.

А.В. ФРОЛОВ¹, А.П. ОРЛОВ^{1,2}, Д.М. ВОРОПАЕВ^{1,3}, А.А. СИНЧЕНКО^{1,4}, П. МОНСО⁵

¹ИРЭм. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Россия

⁴МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Институт Нееля НЦНИ, Гренобль, Франция

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ НЕРАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ В СОЕДИНЕНИЯХ $R\text{Te}_3$ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ

В монокристаллических микроэлементах тербия исследованы особенности процессарелаксации неравновесного состояния волны зарядовой плотности (ВЗП), в том числе при кратковременном нагреве и приложении постоянного электрического поля. Показано, что оба фактора значительно влияют на процесс релаксации, а нахождение системы в режиме движущейся ВЗП переводит систему центров пиннинга в некое промежуточное состояние.

A.V. FROLOV¹, A.P. ORLOV^{1,2}, D.M. VOROPAEV^{1,3}, A.A. SINCHENKO^{1,4}, P. MONCEAU⁵

¹Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

²Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS

³Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

⁴Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁵Neel Institute CNRS, Grenoble, France

PECULIARITIES OF THE EVOLUTION OF THE NON-EQUILIBRIUM CHARGE DENSITY WAVE STATE IN $R\text{Te}_3$ COMPOUNDS UNDER THE INFLUENCE OF CURRENT AND TEMPERATURE

In monocrySTALLINE microstructures of terbium tritelluride, the process of relaxation of the nonequilibrium state of the charge density wave (CDW) was studied, including during short-term heating and the application of a constant electric field. It is shown that both factors have a significant effect on the relaxation process, and the presence of the system in the mode of a moving CDW transforms the system of pinning centers into an intermediate state.

Соединения трителлуридов редкоземельных элементов $R\text{Te}_3$ ($R = \text{Y, La, Ce, Nd, Sm, Gd, Tb, Ho, Dy, Er, Tm}$) – класс квазидвумерных материалов, в которых при охлаждении ниже температуры перехода Пайерлса, T_c , возникает состояние с волной зарядовой плотности (ВЗП), а также наблюдается её «движение» – перенос заряда волной зарядовой плотности при приложении в направлении ВЗП электрического поля выше порогового, E_t [1]. Величина E_t определяется пиннингом – «сцеплением» волны зарядовой плотности с дефектами кристалла.

Обнаружено, что в отличие от квазидвумерных соединений с ВЗП, в соединениях $R\text{Te}_3$ система центров пиннинга ВЗП при охлаждении ниже температуры Пайерлса находится в неравновесном состоянии, причём процесс релаксации в основном состоянии крайне медленный[2,3], в результате чего пиннингом можно управлять с помощью от различных факторов, например, температуры, времени или электрического поля/тока через образец[4].

В работе подробно исследовался механизм релаксации неравновесной волны зарядовой плотности монокристаллических микроэлементах соединения TbTe_3 в разных токовых состояниях в широком диапазоне температур. Транспортные исследования проводились следующим способом: образец охлаждался до заданной температуры T_{exp} , а затем изотермически выдерживался в течение длительного времени под воздействием постоянного электрического поля. Если величина электрического поля была ниже порогового значения, E_t , при котором начинается депиннинг ВЗП, наблюдался сильный временной рост величины E_t – система медленно релаксировала к основному состоянию с повышенным пиннингом. Если же выдержка производилась в режиме движущейся ВЗП, ($E > E_t$), временной рост порогового поля прекращался – система переходила в некоторое промежуточное состояние, которое можно было дестабилизировать только уменьшением электрического поля ниже E_t . Полученные результаты интерпретируются нами как взаимодействие ВЗП с хорошо упорядоченной несоизмеримой структурой атомов теллура.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-22-00331).

Список литературы

1. A. A. Sinchenko, P. Lejay, P. Monceau // Phys. Rev. B, 2012, Vol. 85, №. 24, p. 241104.
2. A. V. Frolov et al. // Physical Review B, 2020, Vol. 101, №. 15, p. 155144.
3. A. V. Frolov, A. P. Orlov, A. A. Sinchenko, P. Monceau // JETP Letters, 2019, Vol. 109, №. 3, pp. 203-206.
4. A. V. Frolov et al. // Applied Physics Letters, 2021, Vol. 118, №. 25, p. 253102.

А.В. ФРОЛОВ¹, А.А. СИНЧЕНКО^{1,2}, П.Д. ГРИГОРЬЕВ³, В.Н. ЗВЕРЕВ⁴, П. МОНСО⁵

¹ИРЭм. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, Черногоровка, Россия

⁴Институт физики твердого тела РАН, Черногоровка, Россия

⁵Институт Нееля НЦНИ, Гренобль, Франция

МАГНИТНЫЕ КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ В ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА В КВАЗИДВУМЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

На примере квазидвумерных соединений трителлуридов редкоземельных атомов $R\text{Te}_3$ экспериментально продемонстрировано, что магнитные квантовые осцилляции проявляются значительно сильнее и наблюдаются до значительно более высоких температур в эффекте Холла по сравнению с эффектом Шубникова-де-Гааза. Показано, что данный эффект является общим свойством квазидвумерных соединений. Предложен новый способ определения температуры Дингла.

A. V. FROLOV¹, A. A. SINCHENKO^{1,2}, P. D. GRIGORIEV³, V. N. ZVEREV⁴, P. MONCEAU⁵

¹Kotelnikov IERAS, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Landau Institute for Theoretical Physics RAS, Chernogolovka, Russia

⁴Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Russia

⁵Neel Institute CNRS, Grenoble, France

MAGNETIC QUANTUM OSCILLATIONS IN THE HALL EFFECT IN QUASI-TWO-DIMENSIONAL COMPOUNDS

On the example of quasi-two-dimensional compounds of tritellurides of rare-earth atoms $R\text{Te}_3$, it was experimentally demonstrated that magnetic quantum oscillations manifest themselves much stronger and are observed up to much higher temperatures in the Hall effect compared with the Shubnikov-de Haas effect. It is shown that this effect is a general property of quasi-two-dimensional compounds. The new method for determining of the Dingle temperature has been proposed.

Квантование Ландау электронов в магнитных полях приводит к магнитным квантовым осцилляциям (МКО), которые дают богатую информацию о поверхности Ферми (ПФ) и состоянию электронов. Обычно МКО наблюдаются в магнитосопротивлении как эффект Шубникова-де Гааза (ШдГ) и намагниченности как эффект де Гааза-ванАльфена. Амплитуда МКО определяется известной формулой Лифшица-Козевича (ЛК) [1]. Эта формула описывает затухание колебаний, обусловленное температурой, рассеянием и эффектами взаимодействия, и подгонка экспериментальных зависимостей амплитуды МКО позволяет извлечь как эффективную массу, так и время рассеяния через температуру Дингла.

В настоящей работе исследовались магнитотранспортные свойства в квазидвумерных соединениях семейства трителлуридов редкоземельных атомов TmTe_3 и SrTe_3 . Измерения магнитосопротивления и сопротивления Холла проводились по методу ван-дер-Паа в магнитных полях до 8 Т и в температурном диапазоне 4.2-100 К.

В TmTe_3 в исследуемом диапазоне полей наблюдаются две частоты МКО 15 Т и 55 Т. Осцилляции ШдГ демонстрируют обычное для магнитосопротивления поведение: температурная зависимость амплитуды МКО, $A(T)$, хорошо описывается формулой Лифшица-Козевича, позволяющей определить эффективную массу: $m_1^* = 0,032m_e$ и $m_2^* = 0,041m_e$. Напротив, для сопротивления Холла $A(T)$, не подчиняется формуле Лифшица-Козевича: уменьшение A с температурой происходит гораздо медленнее, и колебания наблюдаются до очень высокой температуры и являются различными даже при 85К. Полностью аналогичное поведение магнитосопротивления и эффекта Холла наблюдалось и в соединении SrTe_3 . Такое поведение хорошо согласуется с теоретическими расчетами магнитосопротивления и сопротивления Холла в двумерных соединениях в слабых и промежуточных магнитных полях [2]. Из соотношений, полученных в работе [2] следует, что отношение амплитуд МКО магнитосопротивления и сопротивления Холла $A_{MR}/A_H = 2\omega_c \tau$, где ω_c - циклотронная частота, а τ - время рассеяния. Полученное таким образом из экспериментальных результатов значение времени рассеяния при $T=4.2$ К совпало в пределах погрешности со временем рассеяния, полученным из температуры Дингла по формуле Лифшица-Козевича.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-42-09018).

Список литературы

1. I. M. Lifshitz and, A. M. Kosevich // Sov. Phys. JETP, 1955, Vol. 2, p. 636.
2. A. Isihara, L. Smrcka // J. Phys. C: Solid State Phys., 1986, Vol. 19, p. 6777.

У. ХАЛИЛОВ^{1,2}, К. МЕХМОНОВ¹, А. ЭРГАШЕВА¹, Э.К. НЕЙТС²
¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан
²Антверпенский университет, Антверпен, Бельгия

СЫРЬЕВО-ЗАВИСИМЫЙ КАТАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ НАНОУГЛЕРОДОВ

С помощью компьютерного моделирования, мы обнаружили, что рост нанотрубок и нанолент определяется эффектом конкуренции катализатора и сырья. Мы также выявили механизм очистки катализатор содержащих инкапсулированных структур, основанный на окислении. Общее исследование помогает понять управляемый синтез новых углеродных структур с настраиваемыми электронными свойствами.

U. KHALILOV^{1,2}, K. MEHMONOV¹, A. ERGASHEVA¹, E.C. NEYTS²
¹ Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies AS Uz, Tashkent, Uzbekistan
² University of Antwerp, Antwerp, Belgium

FEEDSTOCK-DEPENDENT CATALYTIC SYNTHESIS OF ENCAPSULATED NANOCARBONS

Using computer simulations, we found that the nanotube and nanoribbon growth is determined by a catalyst-vs-feedstock competition effect. We also revealed the oxidation-based purification mechanism of catalyst-containing encapsulated structures. The overall study assists to understand the controllable synthesis of new carbon structures with tunable electronic properties.

The possibility of growth of novel carbon nanostructures inside a carbon nanotube motivates a formation of nanomaterials with controllable dimensions [1]. However, a fully understanding of the mechanisms of the selective synthesis of such encapsulated carbon nanostructures is still elusive.

In our simulation-based study, we investigate the Ni-catalyzed growth mechanism of encapsulated carbon nanostructures from different carbon C_x and hydrocarbon C_xH_y and oxygen-containing hydrocarbon $C_xH_yO_z$ precursors using reactive molecular dynamics simulations and first-principles calculations [2-4].

In particular, our simulation results show that the catalyst-assisting nucleation and consequent growth of different encapsulated carbon nanostructures (Fig.1), i.e., nanotube, nanoribbon, carbyne, etc., can be determined by the choice of different carbon-containing feedstocks [2, 3]. On the other hand, the results indicate that all nanostructures contain metal (catalyst) atoms and thus such structures are less stable than their pure counterparts [2]. Consequently, the oxidation-based purification mechanism of these structures is studied (Fig.1) [2]. Also, we find that chemical modification of the obtained encapsulated nanocarbons results in structural changes as well as semiconducting to metallic transition [3,4].

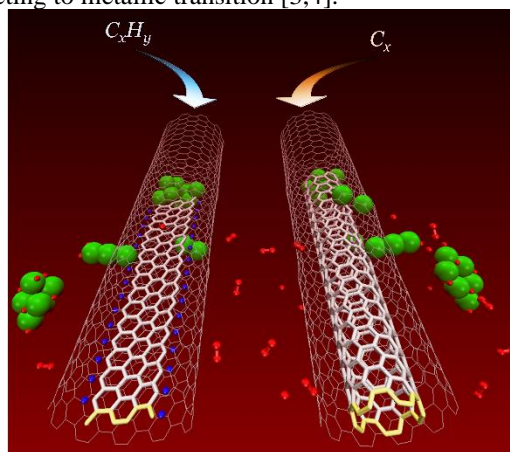


Fig.1. Catalyzed growth of encapsulated carbon nanostructures from different carbon precursors and the oxygen-based purification of the obtained structures.

In overall, this study opens a possible route to the selective synthesis of encapsulated carbon nanostructures with tunable electronic properties.

Список литературы

1. H. Shinohara // Jpn. Appl. Phys., 2018, Vol. 57, p. 020101.
2. U. Khalilov et al. // Carbon, 2021, Vol. 171, pp. 72-78.
3. U. Khalilov et al. // Carbon, 2019, Vol. 153, pp. 1-5.
4. G.R. Berdiyev et al. // J Comput Electron, 2021, Vol. 20, pp. 848-854.

У. ХАЛИЛОВ^{1,2}, М. ЮСУПОВ^{1,2}, П. НЕМАТОЛЛАХИ¹, Д. ХУСАНОВА¹
¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан
²Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

ПРОЦЕССЫ ПРЕНУКЛЕАЦИИ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРИЛЕНА

В этой работе мы провели компьютерное моделирование/расчеты для понимания механизмов процесса пренуклеации органических нанокристаллов перилена в вакууме. В частности, мы обсудили стиль упорядочения образующихся структур, а также направление роста кластеров в зависимости от скорости подачи молекулы перилена. Это исследование помогает лучше понять управление ростом органических нанокристаллов.

U. KHALILOV^{*,1,2}, M. YUSUPOV^{1,2}, P. NEMATOLLAHI², D. HUSANOVA¹
¹Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, AS RUz, Tashkent, Uzbekistan
²University of Antwerp, Antwerp, Belgium

PRE-NUCLEATION PROCESSES OF PERYLENE NANOCRYSTALS

In this work, we carried out computer simulations/calculations to understand the mechanisms of the pre-nucleation process of organic perylene nanocrystals in vacuum. In particular, we discussed the style of ordering of the formed structures, as well as the growth direction of clusters depending on the feeding rate of perylene molecule. This research helps to better understand the control of the growth of organic nanocrystals.

The broad application of organic nanocrystals demands a deeper understanding of their selective synthesis [1,2]. Although several growth methods have demonstrated their ability to control the growth of desired nanocrystals, understanding the onset of crystal nucleation is still elusive. [3,4].

In this work, we computationally studied the mechanisms of the nucleation onset of organic perylene nanocrystals using molecular dynamics simulations, supported by quantum mechanical calculations [5]. In particular, we found that face-to-face and face-to-edge molecular stacking can ultimately lead to the formation of a herringbone-style perylene nanocrystal (Fig.1). Subsequently, the formation of perylene nanoclusters, which continues with the crystal nucleation in the form of unidirectional or multidirectional growth, depending on the feeding rate of perylene molecule in vacuum [5].

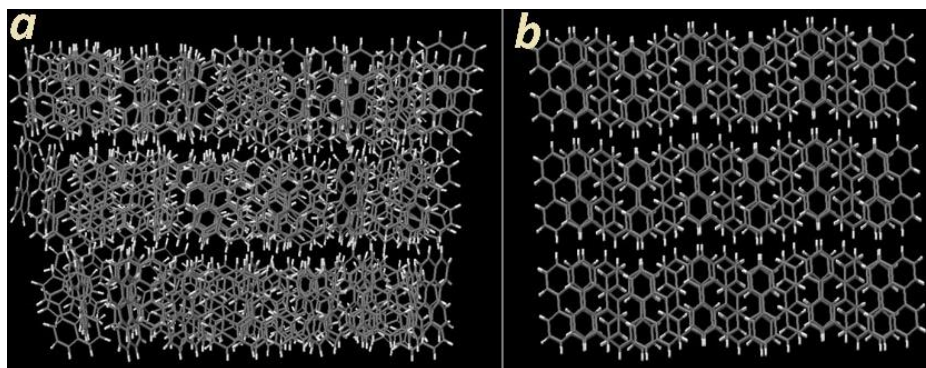


Fig.1. Structure of the obtained perylene cluster (a) and the perylene crystal (b).

This research assists to better elucidate the onset of the selective growth of organic nanocrystals in modern nanotechnology.

Список литературы

1. L. Rongjin et al. // Acc. Chem. Res., 2010, Vol. 43, pp. 529-540.
2. O. Ostroverkhova // Chem. Rev., 2016, Vol. 116, pp. 13279-13412.
3. R.J. Davey et al. // Angew. Chem. Int. Ed., 2013, Vol. 52, pp. 2166-2179.
4. G.C. Sossio et al. // Chem. Rev., 2016, Vol. 116, pp. 7078-7116.
5. U. Khalilov et al. // Uzbek J. Phys, 2021.

В.Т. ЧАН, А.С. КЛИМОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), Томск, Россия

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ МИШЕНИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОЛИПРОПИЛЕНЕ

Представлена зависимость температуры полипропиленовой подложки от времени напыления. Показано, что при электронно-лучевом испарении оксидной и циркониевой керамики в форвакуумной области давлений время нагрева до температуры испарения и время нанесения покрытий должны быть минимизированы для предотвращения перегрева полипропиленовой подложки. При этом повышение скорости нанесения покрытий ограничено интенсификацией кипения керамической мишени и формированием большого количества капельной фазы.

V.T. TRAN¹, A.S. KLIMOV¹

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russia

INFLUENCE OF ELECTRON BEAM EVAPORATION MODES ON THE FORMATION OF CERAMIC COATINGS ON POLYPROPYLENE

The dependence of the temperature of the polypropylene substrate on the deposition time is presented. It is shown that during electron beam evaporation of aluminum oxide and zirconium ceramics in the forevacuum pressure region, the heating time to the evaporation temperature and the coating time should be minimized to prevent overheating of the polypropylene substrate. At the same time, the increase in the coating rate is limited by the intensification of the boiling of the ceramic target and the formation of a large amount of the droplet phase.

Полимерные материалы находят широкое применение в современной промышленности – от авиационной до медицинской. Существенный недостаток полимеров заключается в их низкой теплостойкости и износостойкости. Одним из способов минимизации этих недостатков является нанесение защитных керамических покрытий на поверхности полимеров [1]. Чаще всего для нанесения таких покрытий используются методы термического или лазерного напыления. Хотя плазменное напыление является экономичной и эффективной технологией получения защитных покрытий на металлах, плазменное напыление керамических покрытий на полимеры вызывает термическое повреждение полимерных подложек, снижая эксплуатационные характеристики, как покрытия, так и полимера. В настоящем исследовании для нанесения покрытий используется электронный пучок, формируемый плазменным электронным источником при давлении 10-20 Па. Обработка керамики при таком давлении рабочего газа не вызывает существенную зарядку ее поверхности и позволяет передавать практически всю мощность пучка облучаемой мишени. Испаренные молекулы мишени осаждаются на расположенной в непосредственной близости полимерной мишени.

Нагрев керамических мишеней осуществлялся на вакуумной установке ЭЛУ-1А оснащенной форвакуумным плазменным электронным источником и необходимым оборудованием для электропитания и диагностики. В качестве материала подложек использовались пластинки полипропилена. Защита пластинок от перегрева в процессе нагрева керамики осуществлялась расположением их за тепловыми экранами. Несмотря на тепловую защиту при нагреве керамики до 2200°C полимерные подложки прогревались до температуры более 80°C в течение 60 секунд, что ограничивало время напыления, рис. 1.

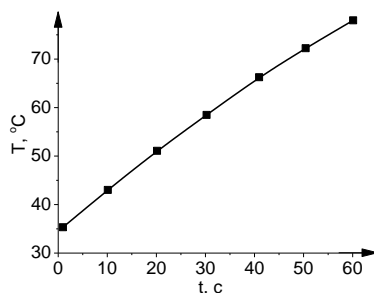


Рис. 1. Зависимость температуры подложки от времени напыления керамики

Кроме того при повышении скорости испарения керамики за счет увеличения ее температуры более 2400°C наблюдалось более интенсивное образование капельной фракции и нагрев полипропиленовой мишени до 80°C происходил уже за время менее 10 секунд.

Исследование полученных при оптимальных режимах покрытий оптическим методом показало наличие пленки на полипропилене.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90184.

Список литературы

1. G. Barroso et al. // Journal of materials chemistry A, 2019, Vol. 7, №. 5, pp. 1936-1963.

Н.П. ЧЕРЕЗОВ, М.И. АЛЫМОВ

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССЕ СВС-ГИДРИРОВАНИЯ НА МАССОВУЮ ДОЛЮ ВОДОРОДА В ТИТАНОВОЙ ГУБКЕ

Изучено влияние давления в реакторе при СВС-гидрировании титановой губки на адиабатическую температуру и массовую долю водорода в титане. Установлено, что наибольшее содержание водорода в титане (3,8 масс. %) наблюдается при давлении водорода 30 атм, дальнейшее увеличение давления не приводит к повышению массовой доли водорода в титане.

N.P. CHEREZOV, M.I. ALYMOV

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

INFLUENCE OF HYDROGEN PRESSURE DURING SHS-HYDROGENATION ON THE MASS FRACTION OF HYDROGEN IN A TITANIUM SPONGE

The influence of the pressure in the reactor during the SHS-hydrogenation of a titanium sponge on the adiabatic temperature and the mass fraction of hydrogen in titanium has been studied. It was found that the highest hydrogen content in titanium (3.8 wt. %) is observed at a hydrogen pressure of 30 atm, a further increase in pressure does not lead to an increase in the mass fraction of hydrogen in titanium.

Хранение водорода в форме гидридов металлов или интерметаллических соединений является наиболее компактным и безопасным способом. Материалы для хранения водорода на основе титана являются наиболее перспективными, поскольку имеют ряд достоинств: удовлетворительные свойства абсорбции/десорбции, хорошую водородную емкость и низкий удельный вес [1]. Дальнейшее развитие таких материалов направлено на совершенствование процессов абсорбции/десорбции водорода и увеличение водородной емкости.

Применение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволяет значительно повысить эффективность технологии синтеза гидроксида титана. К основным преимуществам СВС-гидрирования можно отнести: снижение времени гидрирования, уменьшение расхода электроэнергии, снижение содержания вредных примесей. В работе [2] авторами методом СВС были получены гидриды с повышенным содержанием водорода.

В настоящей работе был синтезирован гидрид титана из титановой губки марки ТГ-100 размером 5-20 мм в герметичном СВС-реакторе объемом 2 л. Начальное давление водорода в реакторе составляло: 20, 25, 30, 35, 40 атм. Содержание водорода в полученном гидриде титана определяли методом химического анализа по ГОСТ 24956-81.

На рис. 1 представлено влияние давления водорода в процессе синтеза в реакторе СВС на содержание водорода в гидриде титана и адиабатическую температуру.

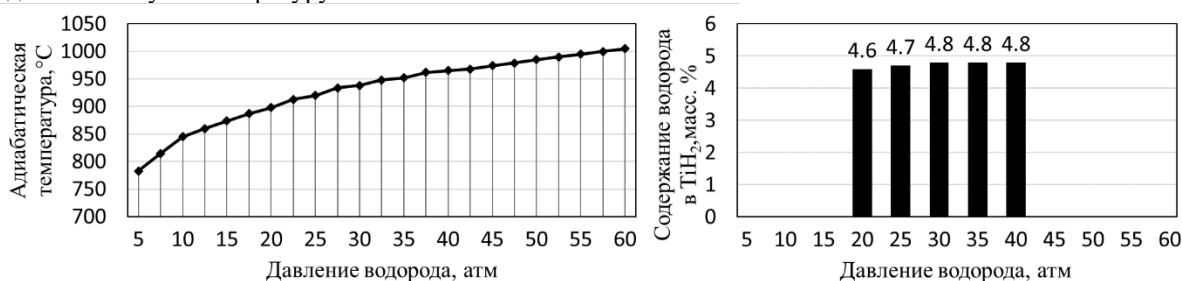


Рис. 1. Зависимость адиабатической температуры и содержания водорода в гидриде титана от давления водорода в реакторе

Расчет адиабатической температуры в зависимости от давления водорода в реакторе показал, что при СВС-гидрировании температура повышается с ростом давления. Адиабатическая температура горения из-за существующих тепловых потерь в условиях экспериментов, как правило, выше реальной температуры горения.

Из результатов химического анализа было установлено, что при синтезе гидрида титана методом СВС возможно получение гидрида с содержанием водорода выше стехиометрического 4,04 масс. %. Было отмечено, что с повышением давления в реакторе до 30 атм, содержание водорода достигает 4,8 масс. %, дальнейшее повышение давления не приводит к повышению содержания водорода в гидриде. Синтез гидридов при высоких давлениях водорода является весьма перспективным, поскольку можно добиться повышенной водородной емкости за счет концентрационной диффузии.

Список литературы

1. E. David // Journal of Materials Processing Technology, 2005, Vol. 162, pp. 169-177.
2. А.Г. Александян, Д.Г. Маилян, С.К. Долуханян и другие // Альтернативная энергетика и экология, 2008, № 9, стр. 22-26.

Н.С. ШАЙТУРА, М.Н. ЛАРИЧЕВ

Институт Химической Физики им. Семёнова, Москва, Россия

ЧАСТИЦЫ С АЛЮМИНИЕВЫМ ЯДРОМ И ГИДРОКСИДНОЙ ОБОЛОЧКОЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КЕРАМОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Проанализированы возможные пути создания керамометаллических изделий методом селективного лазерного плавления частиц с алюминиевым ядром и оксидной оболочкой. Такие частицы могут быть получены жидкофазным окислением водой при атмосферном давлении и температурах до 100°C сферических микронных алюминиевых частиц, позволяющим формировать оксидные покрытия различной толщины, контролируемого элементного и фазового состава на поверхности частиц.

N.S. SHAITURA, M.N. LARICHEV

Semenov Research Center of Chemical Physics, Moscow, Russia

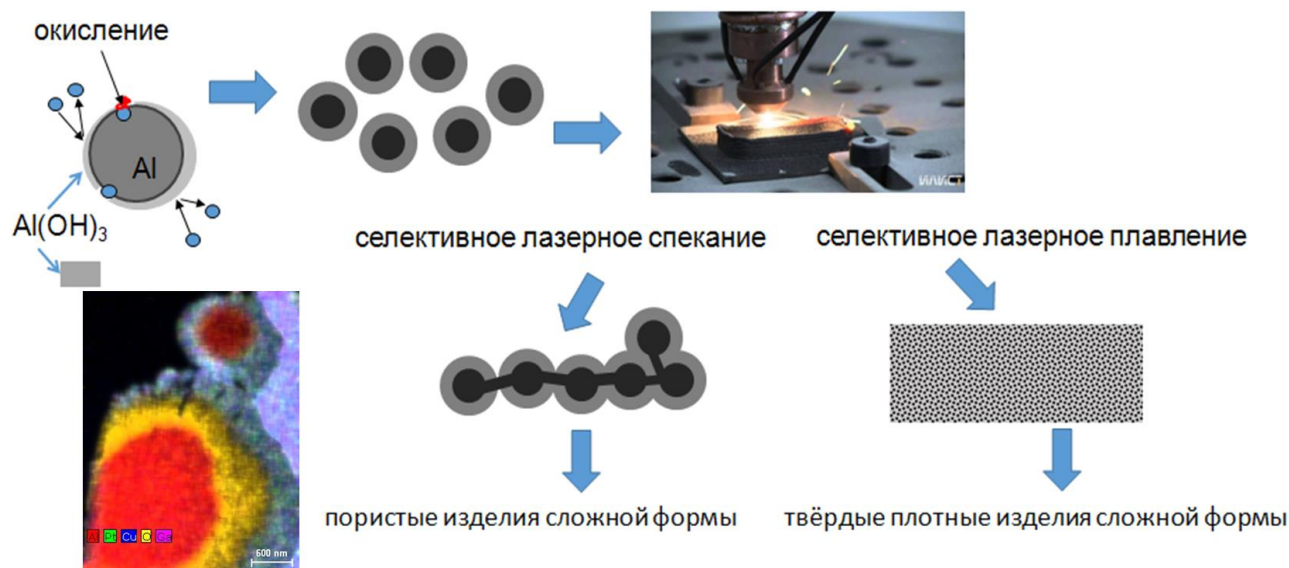
PARTICLES WITH AN ALUMINUM CORE AND A HYDROXIDE SHELL AS A BASIS FOR CREATING CERAMIC-METAL PRODUCTS BY SELECTIVE LASER MELTING

Possible ways of creating ceramic-metal products by selective laser melting of particles with an aluminum core and an oxide shell are analyzed. Such particles can be obtained by liquid-phase oxidation with water at atmospheric pressure and temperatures up to 100 °C of spherical micron aluminum particles, which allows the formation of oxide coatings of various thicknesses, controlled elemental and phase composition on the surface of the particles.

Частицы, покрытые оксидной оболочкой, полученные низкотемпературным окислением алюминия водой, представляется целесообразным использовать для разработки двух типов метало-оксидных материалов:

1. Металло-оксидный каркас (наполнитель) в металлической матрице. Этот тип может быть реализован методом селективного лазерного спекания с использованием металлического алюминия ядра частицы, контакт с которым реализуется при формировании оксидного покрытия на поверхности частицы. При этом могут быть сформированы матрицы различной плотности за счёт дополнительного добавления алюминиевых частиц. Изделия, полученные таким методом, могут быть использованы, например, в катализе, поскольку оксид алюминия, обладающий развитой поверхностью, широко используется в качестве катализатора и носителя катализаторов, а одним из требований, предъявляемых к современным катализаторам, является наличие особой формы, обеспечивающей оптимальные динамические потоки газа или жидкости.
2. Второй вариант металлоксидного материала может быть реализован методом селективного лазерного плавления при таких параметрах 3D принтера, при которых плавится не только алюминий, но и оксидная оболочка. В этом случае будут получены плотные непористые твёрдые изделия сложной формы.

Таким образом, данная работа демонстрирует перспективность использования частиц с алюминиевым ядром и гидроксидной оболочкой в 3D печати.



М. ЭРНАЗАРОВ, Х.К.РАШИДОВ, У.М. НУРАЛИЕВ, С.А. ТУЛАГАНОВ

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВ АНГРЕНСКОЙ ТЭС

Переработка золошлаковых отходов ТЭС с комплексной утилизацией компонентов золы с применением галогенаммонийной технологии позволяет эффективно, с минимальными энергетическими и трудовыми затратами выделить элементы из золы. Возможно выделение аморфного кремнезема, оксида железа и алюминия, а также других примесей. Чистота продуктов не ниже 99 %. Регенерация реагента на уровне 96%. Технология экологически безопасная, безотходная.

ASH AND SLAG PROCESSING AT ANGREN (TPP)

M. ERNAZAROV, H.K. RASHIDOV, U.M. NURALIEV, S.A. TULAGANOV

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

Processing of ash and slag wastes from thermal power plants with complex utilization of ash components using halogen-ammonium technology makes it possible to efficiently separate elements from ash with minimal energy and labor costs. It is possible to isolate amorphous silica, iron and aluminum oxide, and other impurities. The purity of the products is not less than 99%. Reagent regeneration at the level of 96%. The technology is environmentally safe, waste-free.

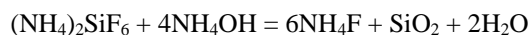
В последнее время наиболее актуальны вопросы, связанные с улучшением экологической ситуации не только в Узбекистане, но и за ее пределами, имеют техногенный характер. За многие годы работы Ангренской и Ново-Ангренской ТЭС образовались огромное количество золошлаковых отходов, которые требуют пристального внимания с целью утилизации или переработки для улучшения экологической ситуации в стране и решения производственных проблем с получением определенного вида сырья и материалов.

В настоящее время золошлаковые отвалы Ангренской и Новоангренской ТЭС занимают площадь свыше 115 га. В отличие от природных минералов золошлаки уже прошли термическую обработку, поэтому извлечение из них ценных компонентов значительно удешевляет технологию.

Целью настоящей работы является утилизация золошлаковых отходов (ЗШО) путем их комплексного использования, задача – разработать технологию переработки комплексного извлечения ценных компонентов, расширить минерально-сырьевую базу ценных компонентов.

Технологические пробы ЗШО ТЭС с целью определения концентрации металлов и различных ценных компонентов для лабораторных исследований, были отобраны из четырех различных участков, и проведены полный химический анализ в лаборатории Госкомгеологии РУз ГП «ИМР».

Опыты по переработке золошлаков провели согласно разработанной нами технологической схеме [1]. Вначале отделяют содержащее макрокомпоненты, таких как диоксид кремния и железа. Диоксид кремния отделяют сублимацией гексафторсиликата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ при температуре 400°C . После гидролитического осаждения $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ получаем аморфный диоксид кремния чистотой 99,63 % по реакции.



Железо отделяем магнитной сепарацией. Следует отметить, что содержание железа в немагнитной части значительное. Для увеличения извлечения железа из немагнитной части коллективного концентрата, разработана методика перевода немагнитного оксида железа в магнитную форму с использованием радиационной обработки материала импульсным инфракрасным излучением на базе функциональной керамики синтезированный в Институте Материаловедения на Большой Солнечной Печи (Паркент). При этом более 95% немагнитного железа переходит в магнитный оксид железа.

Применяемые реагенты (гидрофторид аммония) легко регенерируются при отсутствии твердых, жидких и газообразных отходов, что позволяет многократно использовать в технологическом процессе.

Замкнутый технологический процесс с максимальной степенью регенерации (до 96%) используемых реагентов, и высокая прибавочная стоимость конечных продуктов обеспечивают рентабельность предлагаемого метода и экологическую безопасность промышленного производства и окружающей среды.

Лабораторно-экспериментальными исследованиями выявлены оптимальные технологические условия переработки для карт с высоким содержанием железа – золошлаковых отвалов Ангренской ТЭС. Показано кратное увеличение ценных компонентов после отделения макрокомпонентов, остаточный кек легко перерабатывать гидрометаллургическими методами.

Список литературы

1. М. Эрناзаров, А.У. Самадов, Б.Р. Раимжанов и др. // Способ переработки золотосодержащего сырья // Патент РУз № 1AP 05376 от 08.04.2014 г.

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НАНОЧАСТИЦАМИ

Представлены результаты исследования влияния на свойства покрытий наночастиц, полученных методом импульсной лазерной абляции и методом электрического взрыва проводников в жидкости. Показано, что введение наночастиц в меламиноалкидный лакокрасочный материал приводит к улучшению эксплуатационных свойств лакокрасочных покрытий.

A.G. JURGO

YankaKupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

OBTAINING WEAR-RESISTANT COATINGS BY MODIFICATION OF PAINTING MATERIALS WITH NANOPARTICLES

The results of studying the influence of nanoparticles obtained by the method of pulsed laser ablation and the method of electric explosion of conductors in a liquid on the properties of coatings are presented. It has been shown that the introduction of nanoparticles into a melamine-alkyd paint material leads to an improvement in the performance properties of paint coatings.

Развитие промышленности ставит задачу разработать дешевых лакокрасочных материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Одним из методов решения этой задачи является введение различных модификаторов в известные краски. Использование наночастиц в красках позволяет создавать лакокрасочные покрытия с улучшенными или новыми свойствами. К ним относятся: высокая коррозионная стойкость, стойкость к механическим воздействиям, повышенная защита от УФ-излучения. Введение наночастиц в количествах сотых долей процента приводит к весомым изменениям свойств лакокрасочных покрытий [1]. Показано, что введение наночастиц SiO_2 в полиуретановые и акрилмеламиновые краски позволяет повысить прочность этих лакокрасочных покрытий.

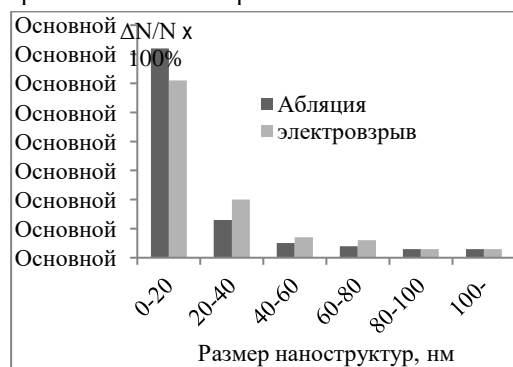


Рис.1

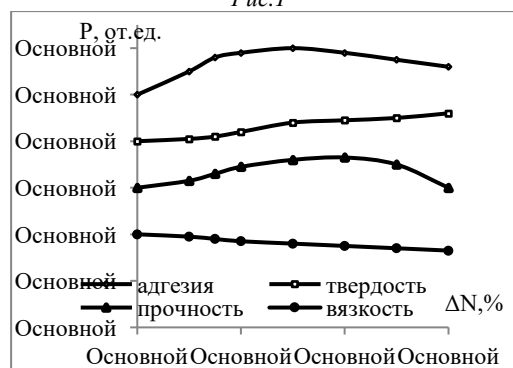


Рис.2

В исследованиях, представленных ниже, использовалась краска МЛ12 модифицированная нанодисперсным углеродом, который получался методом лазерной абляции графита аналогично [2,3] и электрическим взрывом тонких графитовых стержней, аналогично [4,5]. Для электрического взрыва использовались системы, построенные по типу систем питания эксимерных лазеров [6,7]. Размерные распределения полученных наночастиц представлены на рис.1. Влияние временного фактора на поведение наночастиц коррелировало с описанным в [8]. На рис.2 приведены зависимости свойств полученных покрытий от процентного содержания наночастиц. Исследования покрытий проводились стандартными методами. Для этого шлифованные и обезжиренные стальные пластины толщиной 1 мм окрашивались краской с наночастицами. Видно, что адгезия, твердость и прочность при введении наночастиц в краску возрастают (до 20 %). Для достижения высоких показателей лакокрасочных покрытий в краску вводились поверхностно-активные вещества ПАВ. Введение наночастиц в лакокрасочный материал приводит к изменению характера формирования структуры лакокрасочного покрытия за счет взаимодействия алкидных и меламиноформальдегидных смол с наночастицами. Образуются связи полимер-наночастица, которые при деформации разрушаются и снова восстанавливаются. Это приводит к повышению ударной прочности покрытия. Также до 15% снижается вязкость готовой краски. Таким образом, введение наночастиц в меламиноалкидный лакокрасочный материал приводит к улучшению эксплуатационных свойств лакокрасочных покрытий.

Список литературы

1. Верхоланцев В. В. // Лакокрасочные материалы и их применение, 2004, № 10, стр. 20-23.
2. Зноско К.Ф. // ВеснікГрДУімяЯнкі Купалы. Сер. 2, Мат.. фіз.. інфарм., выліч. тэхн. і кір., 2020, Т. 10, № 3, стр. 100-113.
3. Зноско К.Ф. // Лещик С.Д. ВеснікГрДУімяЯнкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка, 2021, Т. 11, № 1, стр. 45-58.
4. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Тарковский В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы, Сер. 6 Тэхніка, 2017, Том 7, № 1, стр. 56-65.
5. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Тарковский В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы, Сер.6, Тэхніка, 2018, Том 8, № 1, стр. 50-61.
6. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курганский А.Д. // Квантовая электроника, 1989, Том 16, № 11., стр. 2228-2231.
7. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Володенков А.П. // Журнал прикладной спектроскопии, 1999, Том 66, № 5, стр. 702-707.
8. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Лещик С.Д. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.6, Тэхніка, 2017, Том 7, № 2, стр. 47-57.

И.А. ТЕРЕЩЕНКО¹, О.В. ТИХОНОВА^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
²НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобелыцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ЭКСИТОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСИСТЕМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЧАСТОТНЫХ МОД КВАНТОВОГО ПОЛЯ

Аналитически исследовано образование экситонов Френкеля в полупроводниковых наносистемах под действием набора частотных мод неклассического электромагнитного поля. Проанализированы особенности этого процесса в случае, когда квантовое поле характеризуется спектральным распределением, соответствующим конкретной моде Шмидта.

I.A. TERESHCHENKO¹, O.V. TIKHONOVA^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-2, 119991, Moscow, Russia
²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-2, 119234, Moscow, Russia

FEATURES OF EXCITON FORMATION INDUCED IN SEMICONDUCTOR NANOSYSTEMS BY MULTIFREQUENCY QUANTUM FIELD

The formation of Frenkel excitons in semiconductor quantum nanosystems under the action of a multifrequency nonclassical electromagnetic field has been analytically investigated. The features of this process are analyzed in the case when the quantum field is characterized by a spectral distribution corresponding to a certain Schmidt mode.

Исследование взаимодействия электромагнитных полей с атомно-молекулярными и наноструктурными системами является важной задачей и вызывает большой научный интерес, не только с фундаментальной точки зрения, но и с учетом широкого спектра практических приложений. Одним из актуальных направлений таких исследований стал анализ воздействия неклассических полей, генерация которых недавно стала возможна в эксперименте. Такие поля зачастую характеризуются широким спектральным распределением (модой Шмидта), представляющим собой набор узких частотных мод [1]. Воздействие таких широкополосных мод Шмидта на атомные и электронные системы в настоящее время мало изучено и представляет собой трудную теоретическую задачу.

В данной работе исследуется возбуждение экситонов и биэкситонов Френкеля в полупроводниковых нанонитях и квантовых ямах под действием набора частотных мод квантового поля. Ранее было показано, что образование экситонов в этом случае может быть описано в формализме бозонных операторов рождения/уничтожения возбуждений [2]. Получено аналитическое решение задачи в случае двух и трех частотных мод, включая в последнем случае моду, резонансную с энергией образования экситона. Проведен детальный анализ зависящего от времени обмена энергией между полупроводниковой системой и квантовым полем. Получена динамика вероятности возникновения экситонов и биэкситонов в зависимости от начального распределения фотонов в частотных модах.

Взаимодействие с двумя нерезонансными модами показало, что в зависимости от начального распределения энергии по спектральным компонентам поля, возможен либо случай конструктивного усиления экситонного возбуждения (симметричное распределение), либо случай, когда квантовая подсистема выступает в роли передатчика энергии (несимметричное распределение). Специфика возбуждений при этом состоит в подавленности экситона в симметричном и биэкситона в несимметричном случае, что видно из рис. 1.

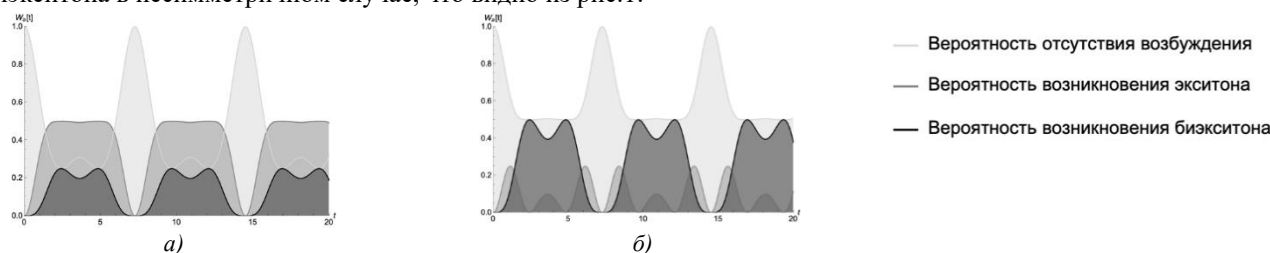


Рис. 1. Вероятности образования экситонов и биэкситонов в случае а) несимметричного $\psi_{in}^1 = |0\rangle_b |2\rangle_c$ и б) симметричного $\psi_{in}^2 = |1\rangle_b |1\rangle_c$, заселения фотонных мод (эффективность взаимодействия, порядка отстройки от резонанса).

При исследовании взаимодействия с тремя частотными компонентами поля был обнаружен эффект формирования собственного состояния системы, приводящего к ограничению энергии, идущей на экситонное возбуждение.

Список литературы

1. D.N. Klyshko // JETP 1993. V. 77. № 2. P. 222-226.
2. A.N. Vasil'ev, O.V. Tikhonova Available at: <http://arxiv.org/abs/2112.04217> / (accessed 2021).

Секция
УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И
РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

В.С. ДЮБКОВ^{1,3}, Е.Д. ЦЫПЛАКОВ^{2,3}

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

² *Московский физико-технический институт МФТИ, Москва, Россия*

³ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ РЕГУЛЯРНОГО СУПЕРПЕРИОДА ДЛЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО СИНХРОТРОНА «СИЛА»

Источники синхротронного излучения на базе электронных ускорителей на протяжении более чем 40 лет широко используются в материаловедении, спектроскопии, кристаллографии, молекулярной биологии и биохимии, медицине, исследованиях быстропротекающих процессов и проч. Уровень развития современных технологий позволяет создавать специализированные синхротроны, предназначенные исключительно для генерации СИ с использованием встраиваемых устройств, таких ондуляторы и вигглеры. Такие специализированные кольцевые ускорители электронов получили название источников СИ 4-го поколения. В настоящее время уже имеется несколько действующих [1-3] и ведётся разработка ещё ряда таких специализированных источников СИ [4-6]. В целях опережающего развития материально-технической базы Российской Федерации указом Президента РФ №356 от 25.06.2019 на базе НИЦ КИ ведётся разработка накопительного синхротрона (источника СИ 4-го поколения) на энергию 6 ГэВ с равновесным значением горизонтального эмиттанса электронного пучка не более 70 пм·рад («СИЛА», ранее ИССИ4) [7,8]. В настоящей работе представлены результаты разработки возможного варианта магнитной структуры регулярного суперпериода с использованием «обратных» поворотных магнитов.

V.S. DYUBKOV^{1,3}, E.D. TSYPLAKOV^{2,3}

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

² *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia*

³ *National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

ABOUT AN OPTION OF A LATTICE FOR A STANDARD CELL OF SYLA SYNCHROTRON

For more than 40 years synchrotron-based x-ray sources as well as free-electron lasers based on linear accelerators have been widely used in materials science, spectroscopy, crystallography, research of fast processes, medicine, molecular biology and biochemistry, medicine, and other applied and scientific tasks. Nowadays state-of-art technologies makes it possible to design and develop specialized synchrotron that is especially aimed to generate SR by means of insertion devices, such as undulators and wigglers. Such specialized circular electron accelerators have been called SR sources of the 4th generation. Currently, there are already several operating [1-3] and a number of such specialized SR sources are under design [4-6]. In order to advance the development of the research infrastructure of the Russian Federation, by Decree of the President of the Russian Federation No. 356 of 25.06.2019, a storage synchrotron (the 4th generation SR source) with an energy of 6 GeV and an equilibrium value of the horizontal emittance of the electron beam of no more than 70 pm·rad (SYLA, former USSR4) is being developed on the basis of NRC KI [7,8]. This paper presents the results of the development of a possible lattice option of the standard cell using reverse bends.

Современным трендом при проектировании накопительных синхротронов является использование периодических магнитных структур (совокупности магнитооптических элементов) типа гибридный ахромат с несколькими поворотными магнитами (НМБА), что позволяет минимизировать эмиттанс циркулирующих электронных пучков и повысить потребительскую характеристику источника СИ – яркость. Магнитная структура типа Н7ВА предложенная и реализованная для источника СИ ESRF-EBS (Гренобль, Франция) [2], где гибридность достигнута применением диполей с градиентом индукции магнитного поля вдоль орбиты синхротрона и диполей с совмещенной квадрупольной функцией, стала стандартом. Такое решение позволило получить пучки электронов в синхротроне ESRF-EBS с равновесным горизонтальным эмиттансом пучка 132 пм. Если в качестве магнитной структуры использовать структуру Н7ВА ESRF-EBS, то уменьшив угол поворота пучка на одном регулярном суперпериоде накопителя «СИЛА» (Синхротрон с Лазером на свободных электронах), за счёт увеличения числа суперпериодов N , можно добиться уменьшения значения ϵ_x до величины 70 пм·рад. Т.к. ϵ_x пропорциональна квадрату энергии циркулирующих электронов и обратно пропорциональна N^3 , то искомое значение эмиттанса 70 пм·рад, при заданной энергии электронов в накопителе 6 ГэВ, достигается при $N = 40$. В работах [7,8] предложены варианты магнитных структур для накопителя «СИЛА», являющиеся результатом масштабирования магнитной структуры ESRF-EBS. Дальнейшее уменьшение ϵ_x возможно с применением так называемых «обратных» магнитов, создающих знакопеременное магнитное поле на орбите электронов [9]. В результате проведённых расчётов параметров элементов суперпериода с «обратными» магнитами удалось достичь значения динамической апертуры порядка 7 мм по горизонтали и 4 мм по вертикали, которое является приемлемым. Оптические функции настроены так, чтобы иметь необходимые значения в местах установки встраиваемых устройств.

Список литературы

1. MAX IV Facility Detailed Design Report / <https://www.maxiv.lu.se/accelerators-beamlines/accelerators/accelerator-documentation/max-iv-ddr>
2. EBS Storage Ring Technical Report / <https://www.esrf.eu/>
3. L. Liu, R. T. Neuenschwander and A. R. D. Rodrigues, Synchrotron radiation sources in Brazil / .Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20180235 (2019).
4. I. Agapov et al. PETRA IV: the ultralow-emittance source project at DESY / J. Synchrotron Rad. (2018). 25, 1277–1290.
5. M. Borland et al., Hybrid seven-bend-achromat lattice for the Advanced Photon Source Upgrade / Proceedings of 2015 IPAC, pp. 1776–1779.
6. HEPS Xu G., Cui X.H., Duan Z., Guo. Y.Y. / Proceedings of International particle accelerator conference. – Denmark, 2017 – P. 2697 – 2699.
7. S. Liuzzo et al., USSR HMBA Storage Ring Lattice Options // 12th IPAC, May 2021, Online, Brazil. TUPAB049.
8. L. Hoummi et al., Optimization and Error Studies for the USSR HMBA Lattice // 12th IPAC, May 2021, Online, Brazil. MOPAB224.
9. E. Levichev, Low emittance electron storage rings, Usp. Fiz. Nauk, vol. 188, no. 1, pp.

А.Е. АКСЕНТЬЕВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ДЕКОГЕРЕНЦИИ ПУЧКА ПРИ НЕАДИАБАТИЧНОМ ИЗМЕНЕНИИ ОРИЕНТАЦИИ ОСИ СТАБИЛЬНОГО СПИНА

В новом эксперименте по измерению ЭДМ, предлагаемом для реализации на NICA ОИЯИ, требуется производить смену ориентации ведущего магнитного поля накопительного кольца. В силу этой необходимости возникает проблема калибровки ведущего поля, решение которой подразумевает смену ориентации оси поляризации пучка из радиального (используемого в измерениях) в вертикальное (используемое в калибровке) направление. При этом, смена ориентации должна происходить с нарушением адиабатичности: иначе спин-векторы частиц пучка последуют за осью поляризации, что не позволит откалибровать поле. Возникает беспокойство касательно того, как требуемое нарушение адиабатичности повлияет на спиновую когерентность пучка.

A.E. AKSENTEV, A.A. MELNIKOV, Y.V. SENICHEV

Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia

INVESTIGATION OF BEAM SPIN-DECOHERENCE UNDER UNADIABATIC INVARIANT SPIN AXIS ORIENTATION CHANGE

The new EDM-measurement experiment proposed for implementation at NICA, JINR requires the switching of the storage ring's guiding magnetic field's polarity. As a result of this requirement there arises the problem of calibrating the guiding field, whose solution involves changing the beam polarization axis' orientation from the horizontal (used in the measurement) to the vertical (used in the calibration) direction. The necessary change of orientation rapidity exceeds the adiabaticity condition; otherwise the beam particles' spin-vectors will follow the polarization axis, thus undermining the calibration procedure. Hence concern has been voiced as to how this violation of adiabaticity will affect the beam spin-coherence.

В методе определения ЭДМ, основанном на измерениях частоты спин-прецессии пучка, контроль систематических ошибок производится путём сравнения частот спин-прецессии пучка, движущегося в одном и том же накопительном кольце в разных направлениях. Для реализации этого необходима смена полярности ведущего поля кольца, а также восстановление эффективной энергии Лоренца пучка в каждом цикле. Процедуру восстановления эффективной энергии Лоренца мы называем “калибровкой ведущего поля кольца.” Метод калибровки ведущего поля основан на связи между эффективной энергией пучка и его частотой спин-прецессии: измеряя частоту спин-прецессии пучка и настраивая ведущее поле таким образом, чтобы получить совпадение частот в каждом цикле, возможно восстановить эффективную энергию пучка с необходимой точностью. Ни один другой метод калибровки ведущего поля не сравним с калибровкой посредством измерений частоты спин-прецессии.

Однако, измерения частоты необходимо проводить в плоскости, перпендикулярной плоскости измерения частоты для определения ЭДМ; иначе, ЭДМ будет составлять систематическую ошибку калибровки. Следовательно, необходимо изменять ориентацию оси стабильного спина частиц на перпендикулярную в калибровочных циклах. Если скорость изменения ориентации оси удовлетворяет условию адиабатичности (Рис. 1), т.е. не превосходит частоту прецессии спин-векторов частиц вокруг этой оси, реальная поляризация пучка следует за направлением оси стабильного спина. Это контр-продуктивно идее метода калибровки; соответственно, изменение оси поляризации должно происходить неадиабатично (Рис. 2). Но в этом случае встаёт вопрос о сохранности поляризованности пучка. Этот вопрос мы и постарались рассмотреть.

С.В. МАЦИЕВСКИЙ^{1,2}, В.И. РАШЧИКОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ В ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR*

Исследуются коллективные эффекты в проектируемом в настоящее время источнике синхротронного излучения четвертого поколения USSR (проект СИЛА). В процессе взаимодействия заряженных частиц с элементами вакуумной камеры накопителя пучок наводит поля, которые могут приводить к неустойчивостям, ограничивающим либо заряд в сгустке (односгустковые неустойчивости), либо суммарный ток накапливаемого пучка (многосгустковые неустойчивости). Ионы, возникающие в процессе ионизации остаточного газа, также могут являться причиной неустойчивости пучка. Оценены пороги возникновения различных типов неустойчивостей.

S.V. MATSIYEVSKIY^{1,2}, V.I. RASHCHIKOV^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia
²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

STUDIES OF COLLECTIVE EFFECTS IN SYNCHROTRON RADIATION SOURCE USSR*

Collective effects are studied in the fourth-generation synchrotron radiation source USSR (the SILA project) currently being designed. During the interaction of charged particles with the elements of the vacuum chamber of the storage ring, the beam induces wakefields that can lead to instabilities that limit either the charge in the bunch (single-bunch instabilities) or the total current of the accumulated beam (multi-bunch instabilities). The ions that appear during the residual gas ionization can also be the cause of the beam instability. The thresholds for the occurrence of various types of instabilities are evaluated.

В источниках синхротронного излучения четвертого поколения предъявляются жесткие требования к эмиттансу накопленного пучка <100 пм. Получение таких параметров оказывается невозможным без детального анализа неустойчивостей, возникающих в процессе длительного взаимодействия (накопления) пучка с вакуумной камерой кольца. Наводимые пучком кильватерные поля существенным образом влияют на его динамику, ограничивая достижимые параметры по току и эмиттансу.

Анализ неустойчивостей проводился с помощью компьютерного моделирования. Для этих целей был создан сайт <https://bitbucket.org/cremlin-plus-wp4-task3/>, на котором собраны необходимые для расчета программы, а также база входных данных и полученных результатов, которыми могли пользоваться все члены проекта. Значительная часть расчётов выполнялась с помощью нескольких программ, а их сравнение позволило подтвердить достоверность полученных результатов.

В качестве импедансной модели вакуумной камеры на первом этапе использовалась масштабированная импедансная модель источника синхротронного излучения Европейского центра синхротронных исследований ESRF, параметры которого максимально близки к проектируемому нами.

Порог микроволновой неустойчивости, рассчитанный с помощью программ ELEGANT, SBSC и PyHEADTAIL, оказался порядка 1мА [1]. Моделирование внутривпучкового рассеяния позволило определить время жизни пучка, которое для тока 5 мА составило 5 часов. Порог поперечной неустойчивости связанных мод (transverse mode-coupling instability – TMCI) оказался равным 0.4 мА в вертикальной плоскости при нулевой хроматичности. Увеличение хроматичности позволяет существенно увеличить порог пропускания для одиночного сгустка. Так при вертикальной хроматичности 5 удастся накопить без потерь ток в 5 мА. Предварительный анализ многосгустковых неустойчивостей показал, что несмотря на то, что предусматривается использование средств подавления волн высших типов колебаний, тем не менее остается необходимым применение обратной связи для демпфирования неустойчивостей, вызванных резистивным импедансом стенок камеры и ионной неустойчивостью.

В ходе исследований импедансная модель постоянно уточняется как за счёт замены в ней отдельных элементов вакуумной камеры на элементы с меньшими импедансами, так и за счёт использование более точных программ расчета импедансов существующих элементов. Так, например, для вычисления резистивного импеданса вакуумной камеры использована программа BeamImpedance2D, которая в отличие от использованной ранее ImpedanceWake2D, позволяет учесть отличие реального сечения камеры от эллиптического.

Список литературы

1. Y. Chae, S.V. Matsievsky, V.I. Rashchikov, M. Zobov, “Microwave Instability in the USSR Synchrotron Radiation Source under Design”, Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 12, pp. 1968–1972. doi: 10.1134/S1063778821100100

*This project has received funding from the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 871072

В.С. ДЮБКОВ, С.М. ПОЛОЗОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ КОМПТОНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НИЯУ МИФИ

Создание сравнительно недорогих и компактных (с размерами в несколько метров) рентгеновских источников возможно с помощью обратного комптоновского рассеяния фотонов лазерного излучения на электронном пучке. Такие источники востребованы в области материаловедения (новые материалы, диагностика наноструктур на атомном уровне), включая исследования нано- и биосистем (динамические процессы в живых клетках), медицины и фармакологии (разработка и создание новых лекарств), физики и химии быстротекущих процессов (горение, взрыв). В работе представлены текущие результаты разработки компактного накопителя для генерации фотонного излучения в диапазоне энергий 5-30 кэВ и исследования особенностей формирования неустойчивостей движения релятивистских пикосекундных электронных сгустков.

V.S. DYUBKOV, S.M. POLOZOV

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

ABOUT THE STATUS OF NRNU MEPhI COMPTON SOURCE DESIGN

A development of comparatively cheap and compact (several meters scale) X-ray sources is possible with the help of inverse Compton scattering of laser photons on an electron beam. Such sources are used in the field of materials science (new materials, diagnostics of nanostructures at the atomic level), research of nano- and biosystems (dynamic processes in living cells), medicine and pharmacology (new drugs R&D), physics and chemistry of fast-flowing processes (burning, explosion). The paper presents the current results of the design of a compact storage ring for generating the photons in the energy range of 5-30 keV and investigations of the development of relativistic picosecond electron beam dynamics instabilities.

Для генерации излучения в световом ондуляторе в диапазоне энергий 5-30 кэВ на основе обратного комптоновского рассеяния предлагается использовать компактный синхротрон, работающий в режиме накопления, с top-up инжекцией электронов из нормально проводящего линейного ускорителя 3 ГГц диапазона с перестраиваемой энергией 20-60 МэВ. Данное решение имеет распространение в мировой практике и впервые, вероятно, было предложено в работе [1]. На сегодняшний день существует коммерчески реализуемый «комптоновский» источник Lyncean Compact Light Source (США), накопительное кольцо которого имеет магнитную структуру типа MBA (multi-band achromat) [2,3] с энергией электронного пучка от 7 до 35 МэВ и генерируемым полным фотонным потоком 10^{11} фотон/сек.

В НИЯУ МИФИ также ведётся разработка компактного источника излучения на основе обратного комптоновского рассеяния [4-6], который станет не только исследовательской установкой, но и учебной-научной базой МИФИ. В результате произведённых расчётов, исходя из требований к параметрам электронного пучка в месте его встречи с потоком лазерных фотонов, предложен вариант магнитной структуры накопительного синхротрона (см. рис. 1), обеспечивающий хорошие значения таких параметров накопителя, как динамическая апертура (88 кв. мм) и энергетический аксептанс (более $\pm 3\%$), определяющих время жизни сгустка. Значения горизонтальной β_x и вертикальной β_y функций в точке взаимодействия с лазерным импульсом составляет 23 см и параболически возрастает при удалении от неё, но не превышает 30 см на длине 30 см. В свою очередь, при проектировании вакуумных камер накопителя необходимо знать экстремальные значения бета-функций накопителя. Максимальное значение β_x составляет 4,987 м, а β_y – 8,681 м. Для корректировки хроматичности в магнитной структуре накопителя предусмотрены две пары секступольных линз. Коррекция хроматичности необходима ввиду конверсии разброса частиц по импульсам в разброс частиц по продольной координате, что необходимо учитывать при расчёте эффекта Тушека. Основные параметры накопительного синхротрона представлены в таблице.

Таблица. Основные параметры накопительного синхротрона МИФИ

Параметр	Значение
Периметр, м	10,197
Энергия, МэВ	60
Равновесный горизонтальный эмиттанс, нм·рад	9
Относительный энергетический разброс, %	0,009
Кэффициент пространственного расширения орбит	0,0634
Равновесная длина электронного сгустка при нулевом токе, мм	0,13
Приведенные бетатронные частоты (горизонт., вертикальн.)	2,802, 1,232
Хроматичность (горизонт., вертикальн.)	-1, -1
Потери энергии электронным сгустком за один оборот, эВ	4,04
Суммарное амплитудное значение ВЧ напряжение резонаторов, кВ	300
Рабочая частота ВЧ резонаторов, МГц	3000
Кратность	102

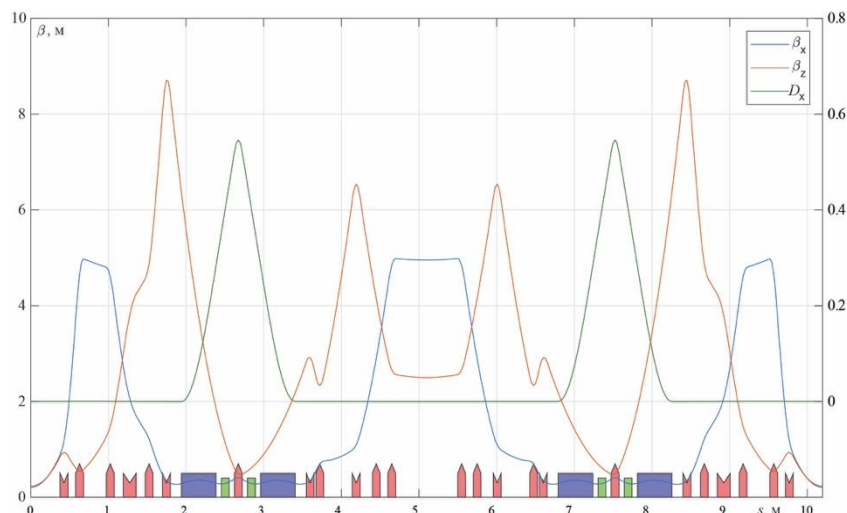


Рис. 1. Магнитная структура компактного накопительного синхротрона и её оптические функции.

Для оценки времён развития неустойчивостей энергия электронного пучка варьировалась от 20 до 60 МэВ. Рассчитанные значения радиационных интегралов при энергии электронов 60 МэВ: $I_1 = 0,65 \text{ м}$, $I_2 = 22,16 \text{ м}^{-1}$, $I_3 = 78,16 \text{ м}^{-2}$, $I_4 = 8,04 \text{ м}^{-1}$, $I_5 = 19,87 \text{ м}^{-1}$. Проведенное исследование влияния нелинейных процессов, связанных с влиянием излучения и собственных полей на динамику короткого пикосекундного пучка показало, что основным процессом, ограничивающим время жизни пучка, является однократный эффект Тушека. Для различных энергий электронов и значений заряда в пучке время жизни, определяемое данным эффектом, составляет 1-10 мс. При этом предельный заряд в пучке следует ограничить 200-300 пКл. Время радиационного затухания эмиттанса в накопителе оказалось на пять порядков больше времени жизни по эффекту Тушека, что принципиальным образом отличает разрабатываемый накопитель на энергию в несколько десятков МэВ от накопителей на ГэВ-ные энергии. За времена жизни уменьшением эмиттанса, вызванным радиационным затуханием, можно пренебречь и эмиттанс в накопителе считать постоянным и равным величине при инжекции из линейного ускорителя. Характерные времена развития внутрипучкового рассеяния и микроволновой неустойчивости оказались на порядок выше, чем тушековское время жизни. Как отмечалось выше, для достижения величины энергетического акцептанса достаточной для поддержания устойчивого движения пучка требуется использовать резонатор с эквивалентным напряжением до 300 кВ, которое существенно больше, чем требуемое для компенсации потерь энергии электронов в накопителе. Ограничение заряда в пучке, рассчитанное как пороговое значение для развития микроволновой неустойчивости, наступает при величине близкой к 400 пКл, а по поперечной неустойчивости, вызванной влиянием казистатической компоненты собственного поля пучка, при 370 нКл. Предельный ток пучка, рассчитанный в ходе оценки влияния обменной неустойчивости, ещё на два порядка больше. В целом проведенное исследование показало, что при ограничении заряда в пучке величиной 200-300 пКл возможно добиться приемлемых для работы источника излучения времен жизни пучка порядка 1-10 мс, что потребует, однако, увеличения кратности инжекции до 30-100 пучков в секунду.

Список литературы

1. Z. Huang, R. Ruth // SLAC-PUB-7556, September 1997, P. 11.
2. URL: <https://lynceantech.com>.
3. Rifkin et al // US patent 7277526 B2 (02.10.2007).
4. В.С. Дюбков и др., Предварительные результаты разработки компактного источника излучения на основе обратного комптоновского рассеяния // Сборник трудов конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», Москва, 23–26 марта 2021 года, С. 307-308.
5. V.S. Dyubkov et al., Beam dynamics investigation for a new project of compton back scattering photon source at NRNU MEPhI // Proc. of IPAC'21, Campinas, Brazil, 2021, P. 186-188.
6. V.S. Dyubkov, S.M. Polozov, Storage ring design and beam instabilities investigation for MEPhI's photon source // Proc. of RuPAC 2021, Alushta, Russia, 2021, P. 277-279.

С.М.ПОЛОЗОВ^{1,2}, В.И. РАШЧИКОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА В ФОТОПУШКАХ

С помощью разработанной ранее уточненной модели фотоэмиссии [1] проведен детальный анализ процесса формирования электронного сгустка в ВЧ фотопушке. Исследуются эффекты, оказывающие доминирующее влияние на формирование его эмиттанса и энергетического спектра.

S.M. POLOZOV^{1,2}, V.I. RASHCHIKOV^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia
²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

SIMULATION OF ELECTRON BUNCH FORMATION PROCESS IN PHOTOGUNS

The previously developed improved photoemission model [1] has been applied to a detailed analysis of the process of high-brightness electron bunch formation process in the RF photogun. Space charge-dominated photoemission has a significant influence on the formation of transverse emittance as well as on the energy distribution within the emitted electron bunch.

Для работы современных установок, таких как источники синхротронного излучения, лазеры на свободных электронах, плазменные ускорители и т.д. требуются короткие (~1-20 пс) электронные сгустки с большим зарядом (сотни пКл – единицы нКл), малыми эмиттансом (< 1 мм рад) и энергетическим спектром (< 1 %). Наиболее распространенным источником таких пучков с высокой плотностью фазового пространства в настоящее время являются ВЧ фотопушки. Характеристики пучка, полученные в фотопушке, оказывают определяющее влияние на его параметры на выходе установки. В этой связи детальный анализ процесса формирования пучка в фотопушке является весьма актуальной задачей.

В качестве образца будем использовать фотопушку, разрабатываемую в лаборатории DESY в Цойтене (PITZ) [2] (рисунок 1), поскольку параметры, создаваемых ею пучков наиболее близки к выше упомянутым, а обширный набор экспериментальных данных, полученных в ходе оптимизации таких пушек в PITZ, позволяет нам проводить сравнительный анализ наших расчётов с результатами эксперимента. Для моделирования эмиссии, формирования и ускорения электронов использовался код СУМА [3], модернизация блока эмиссии которого позволила существенно приблизить результаты численного моделирования к экспериментальным данным [4].

На рисунке 1 в качестве примера представлены результаты изменения поперечного эмиттанса пучка вдоль пушки. Как видно из рисунка, в начальной стадии формирования пучка вблизи фотокатода, когда скорости эмитированных электронов ещё не велики, силы пространственного заряда оказывают доминирующее воздействие на его эмиттанс, чем и вызван первый пик на рисунке. В ходе последующего взаимодействия пучка с внешними и собственными электромагнитными полями, происходит формирование его эмиттанса и энергетического спектра за счёт активного перераспределения энергии в продольном и поперечном движениях.

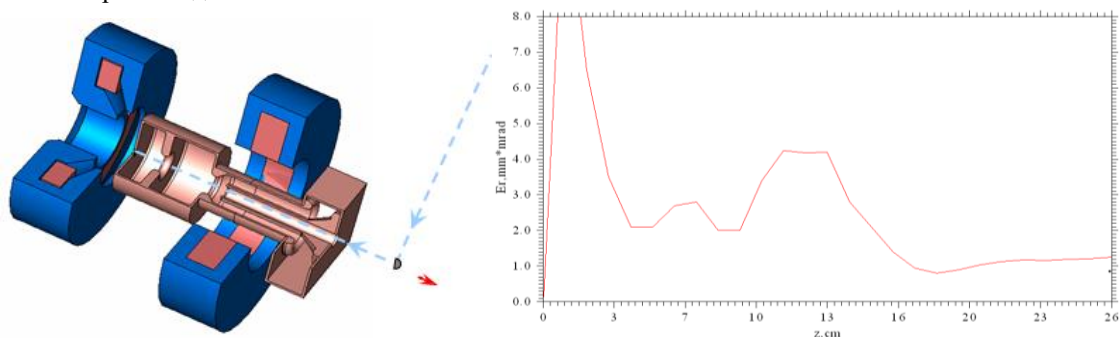


Рис. 1. Исследуемая фотопушка (слева) и зависимость поперечного эмиттанса от продольной координаты

Список литературы

1. S.M. Polozov, V.I. Rashchikov. “Simulation studies on the radiofrequency gun saturated emission”, *Cybernetics and physics*, Vol. 9, no. 2, pp.103–10, 2019
2. M. Krasilnikov *et al.*, “Experimentally minimized beam emittance from an L-band photoinjector”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 15, p. 100701, 2012.
3. V.I. Rashchikov, “Electromagnetic field calculation in complex geometry structures”, *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations*, vol. 10 (18), pp. 50–53, 1990
4. S.M. Polozov, V.I. Rashchikov, M. Krasilnikov, “An Improved Model for Photoemission of Space Charge Dominated Picosecond Electron Bunches: Theory and Experiment”, in *Proc. 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21)*, Campinas, Brazil, May 2021, pp. 2829-2832. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB101
5. M. Krasilnikov, S.M. Polozov, V.I. Rashchikov, “Photoemission of Picosecond Electron Bunches with Large Charge in RF Guns. *Phys. Atom. Nuclei* **84**, 1881–1885 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1063778821100197>

Л.Ю. ОВЧИННИКОВА^{1,2}, А.С. КУРИЛИК
¹ИЯИ РАН, Москва, Россия
²АО «НИИ «Феррит-Домен», Санкт-Петербург, Россия

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ПО ГЛУБИНЕ В ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

Рассмотрена возможность использования нейронной сети для вычисления весовых коэффициентов, соответствующих отдельным кривым Брэгга, при формировании равномерного распределения дозы по глубине для целей протонной терапии.

L. OVCHINNIKOVA^{1,2}, A. KURILIK
¹INR RAS, Moscow, Russia
²Ferrite Domen Co., St. Petersburg, Russia

MACHINE LEARNING FOR DEPTH DOSE DISTRIBUTION FORMING IN PROTON THERAPY

We have considered the possibility of using a neural network for calculation the weight coefficients corresponding to the Bragg curves for forming a uniform depth dose distribution in proton therapy.

При проведении исследований в области создания протонных ускорителей для радиационной терапии, важно иметь возможность, на основе характеристик пучка протонов, быстро оценивать характеристики пространственного распределения поглощённой дозы, а также, на основе желаемых характеристик распределения поглощённой дозы, формулировать требования к пучку протонов, и, следовательно, к ускорителю. Одной из задач является формирование, из отдельных пиков Брэгга, равномерного распределения дозы по глубине в области облучаемой опухоли. Итеративный метод требует сложной формализации и неприменим при последующем переходе к 3D задаче. Система линейных уравнений и минимизация среднеквадратичного отклонения могут давать отрицательные значения весовых коэффициентов [1]. Вышеописанные и другие смежные задачи могут быть решены с применением машинного обучения [2].

Для оценки возможностей ускорителя [3], с использованием Geant4 [4], были выполнены расчёты [5] пространственного распределения поглощённой дозы в воде. С использованием PyTorch [6] была создана и обучена модель нейронной сети. На вход сети подаются требуемые характеристики, на выходе получаются искомые весовые коэффициенты. Результаты показаны на рис. 1.

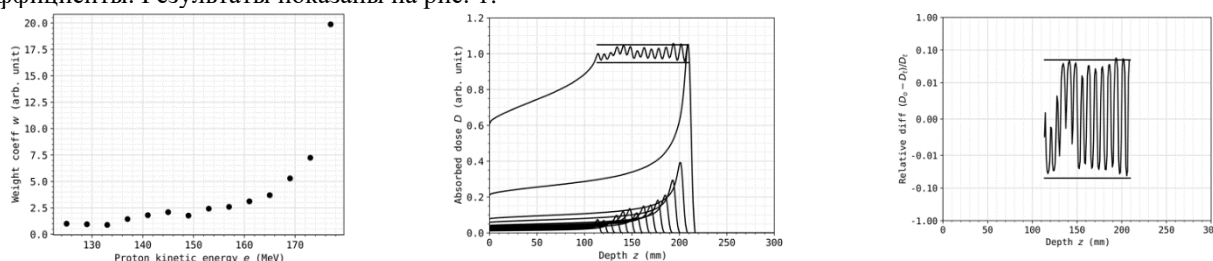


Рис. 1. Полученные, с помощью нейронной сети, весовые коэффициенты - слева. Отдельные кривые Брэгга умноженные на весовые коэффициенты и суммарное распределение - в центре. Относительное отклонение не превышает заданного значения 5% - справа.

В дальнейшем мы планируем улучшить полученные результаты и расширить возможности метода.

Авторы выражают благодарность коллегам из ИЯИ РАН А.П. Дуркину, А.А. Коломийцу и В.В. Парамонову за многочисленные консультации и полезные обсуждения, а также Л.В. Кравчуку и А.В. Фещенко за поддержку в проведении исследований.

Список литературы

1. Яковлев И.А., Методы повышения конформности протонной лучевой терапии. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. 01.04.01. ИЯИ РАН, Москва, 2018 - 109 с. <https://www.inr.ru/rus/referat/jakovlev/dis.pdf>
2. Varian Medical Systems, Inc. RapidPlan Knowledge-Based Planning. <https://www.varian.com/products/radiotherapy/treatment-planning/rapidplan-knowledge-based-planning>
3. V.V. Paramonov, A.P. Durkin, and A. Kolomiets, "A Linear Accelerator for Proton Therapy", in Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 117-119. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04
4. J. Allison et al., Recent developments in Geant4, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 835, 2016, Pages 186-225, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
5. L. Ovchinnikova, S.V. Akulinichev, A.P. Durkin, A. Kolomiets, A. Kurilik, and V.V. Paramonov, "Effect of a Proton Beam from a Linear Accelerator for Radiation Therapy", in Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 182-185. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA41
6. A. Paszke et al., PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library, <https://arxiv.org/abs/1912.01703>

Ю.В. СЕНИЧЕВ¹, А.Е. АКСЕНТЬЕВ¹, А.А. ЗАВАДЦЕВ², А.А. МЕЛЬНИКОВ¹, А.П. КЛАЧКОВ³, Д.А. ЗАВАДЦЕВ²,
Д.В. ЧУРАНОВ², В.С. ЮЦКЕВИЧ²

¹Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия

²ООО «Нано Инвест», Москва, Россия

³ООО «Колибри Инжиниринг», Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ УСКОРИТЕЛЯ ДЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Рассмотрены результаты расчета и проектирования ускоряющего резонатора ионов с пространственно-однородной фокусировкой. Рассчитаны электродинамические характеристики, ввод мощности, динамика пучка ионов и выполнено 3D проектирование резонатора.

Yu.V. SENICHEV¹, A.E. AKSENTYEV¹, A.A. ZAVADTSEV², A.A. MELNIKOV¹, A.P. KLACHKOV³,
D.A. ZAVADTSEV², D.V. CHURANOV², V.S. YUTSKEVICH²

¹ Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Nano Invest, LLC, Moscow, Russia

³ Colibri Engineering, LLC, Moscow, Russia

FEATURES OF A DEUTRON RFQ LINAC

The results of the simulation and design of a RFQ ion LINAC are considered. The electrodynamic characteristics, power coupler, ion beam dynamics are calculated, and 3D design of the resonator is performed.

Главной особенностью дейтронного ускорителя является то, что в случае ускорения частиц с соотношением заряда к массе 1:2, длина резонатора практически удваивается, если ее сравнивать с длиной ускорителя на ту же энергию для протонов. В случае конечной энергии превышающей 1.0 МэВ на нуклон длина резонатора становится критически большой $L_{\text{cav}} \approx 3 \lambda$, где λ -длина волны рабочей моды TE₂₁₁, что приводит к малому частотному разделению между рабочей квадрупольной модой TE₂₁₁ и дипольными модами TE_{11n}. Для разделения мод предлагается использовать окна связи между соседними сегментами резонатора, которые в свою очередь изменяют распределение поля вдоль резонатора. Равномерность восстанавливается с помощью плунжеров, размещенных вдоль резонатора в каждом из 4 сегментов.

Кроме того, авторы обращают внимание на возможное влияние пространственного заряда.

По совокупности сказанного в работе максимально уделяется внимание следующим проблемам:

- исследование электродинамики длинного резонатора на волне TE₂₁₁;
- разделение рабочего и соседних колебаний с помощью введения окон связи;
- выравнивание поля плунжерами, которое требуется после применения окон связи;
- исследование влияния этих искажений на динамику пучка,
- электродинамические расчеты RFQ, определяющие максимально достижимую силу ВЧ фокусировки с учетом ограничения полей в межэлектродном пространстве с точки зрения пробоев;
- эффекты пространственного заряда в одиночном сгустке в RFQ;
- влияние пространственного заряда на поперечные размеры сгустка;
- зависимость коэффициента захвата частиц на входе в RFQ от пикового значения пучка.

Результатом работы является расчет ускоряющего резонатора RFQ со следующими основными параметрами: тип ионов – дейтроны или He⁺⁺, рабочая частота 202 МГц, напряжение инжекции 75 кВ, длина 4.3 м, импульсная мощность питания не более 300 кВт, энергия ускоренных ионов 1.25 МэВ/нуклон, импульсный ток дейтронов 50 мА и He⁺⁺ 10 мА.

На основе выполненных электродинамических расчетов и расчетов динамики пучка выполнено конструирование резонатора RFQ. Резонатор изготавливается из бескислородной меди секционированным по длине и включает три секции, соединяемые фланцами типа CF350. Общая импульсная мощность питания не более 300 кВт подается в резонатор по четырем коаксиальным фидерам типа 4.5” EIA с петлевыми каплерами. Каплер имеет соединительный фланец фидера типа 4.5” EIA на входе, керамический изолятор, петлю связи и вращающийся фланец типа CF100 для присоединения к резонатору. Выполнены электродинамические расчеты геометрии каплеров, обеспечивающих номинальный коэффициент связи четырех фидеров с резонатором близкий к 1. При этом вращение петли связи на фланце CF100 позволяет регулировать коэффициент связи в широком диапазоне. Резонатор включает 20 тюнеров (настроечные плунжеры диаметром 60 мм различной фиксированной длины), установленные на фланцах типа CF63. Вакуумная откачка резонатора осуществляется шестью ионными насосами со скоростью откачки каждого 300 л/с, установленными на фланцах типа CF150.

А.Р. КАРИМОВ^{1,2,3}, В.К. БОГДАНОВ¹, С.А. ТЕРЕХОВ^{1,4}

¹*Институт лазерных и плазменных технологий Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

²*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

³*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия*

⁴*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия*

МЕХАНИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ СВЯЗЕЙ В ПРОСТЫХ ЖИДКОСТЯХ

В работе на примере водной среды обсуждаются необходимые условия инициирования процессов разрушения межмолекулярных связей в потоках с развитой кавитацией под действием внешних акустических полей. Фактически, каждый такой разрыв является точкой, где могут проходить химические реакции, меняющие строение среды. Поэтому некоторую область в окрестности точки разрыва будем называть кинетическим зародышем. Рассматривается случай, когда энергии коллапсирующего пузырька должно хватить для отрыва атома водорода от гидроксильной группы. Исходя из оценки необходимой энергии схлопывающихся пузырьков для разрыва межмолекулярных связей и макроскопических характеристик среды, получены соотношения, описывающие динамику исследуемого процесса. Установлены условия образования заданного числа кинетических зародышей в зависимости от давления, температуры, содержания и размеров газовых пузырьков исследуемой среды. Полученные результаты могут быть использованы для анализа кинетических процессов, определяющих химические изменения в высокомолекулярных жидких средах [1-3].

A.R. KARIMOV^{1,2,3}, V.K. BOGDANOV¹, S.A. TEREKHOV^{1,4}

¹*Institute for Laser and Plasma Technologies National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

²*Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia*

⁴*Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia*

MECHANICALLY INDUCED DESTRUCTION OF INTERMOLECULAR BONDS IN SIMPLE LIQUIDS

Using the example of an aqueous medium, the paper has discussed the necessary conditions for propelling the destruction processes of intermolecular bonds in flows with developed cavitation under the action of external acoustic fields. In fact, each such disruption is a point where chemical reactions can take place that change the medium structure. Therefore, some domain in the vicinity of the discontinuity point shall be treated a kinetic nucleus. We have considered the case when the energy of the collapsing bubble should be sufficient to tear off a hydrogen atom from the hydroxyl group. Based on the estimate of the necessary energy of collapsing bubbles to break intermolecular bonds and the macroscopic characteristics of the medium, relations describing the dynamics of process under consideration are obtained. The conditions for the formation of given number of kinetic nuclei depending on the pressure, temperature, content, and size of gas bubbles in the medium under consideration are established. Besides, it should be noted that the present results might be used to analyze the kinetic processes that determine chemical changes in high-molecular liquid media [1-3].

Список литературы

1. Caruso M. M., Davis D.A., Shen Q. et al. // Chem. Rev. 2009. V. 109, № 11. P. 5755.
2. Каримов А.Р., Богданов В.К., Валиуллин Р.А. и др. // УПФ. 2021. Т. 9, №2. С. 128.
3. Chemat F., Huma Z., Khan M. K. // Ultrasonics Sonochemistry. 2011. V. 18, № 4. P. 813.

А.Р. КАРИМОВ^{1,2,3}, В.К. БОГДАНОВ¹, А.В. ПРОКОПЕНКО¹

¹*Институт лазерных и плазменных технологий Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

²*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

³*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия*

ДИНАМИКА КОЛЛЕКТИВНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ПОЛИМЕРОВ В СЛАБЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В работе, следуя [1-3], обсуждаются процессы структурообразования в полимерных средах. Описывается поведение макромолекул в электромагнитных полях низкой интенсивности. Рассматривается взаимодействие линейной цепочки мономеров с переменным электрическим полем. Определяются частотные характеристики колебаний в описываемых цепочках. Исходя из оценки частотных характеристик определяется спектр коллективных колебаний макромолекул. Отдельное внимание уделяется генерации СВЧ-сигнала для получения необходимого воздействия.

На основании частотно-энергетических соотношений Мэнли-Роу [4] проводится анализ частот, при которых воздействие будет иметь резонансный характер. В результате определяются соотношения мощностей, поглощаемых полимерной средой и мощностей, на которых происходит выделение энергии из среды. Развивается аналогия между когерентными колебаниями макромолекул с двухуровневой квантовой системой, подчиняющейся статистике Бозе-Эйнштейна [5]. Исходя из этого определяются характеристики описываемой системы, при которых населенность состояний будет максимальна. Данная информация будет индикатором значительных изменений в полимерной среде при низкоинтенсивных электромагнитных возмущениях.

A.R. KARIMOV^{1,2,3}, V.K. BOGDANOV¹, A.V. PROKOPENKO¹

¹*Institute for Laser and Plasma Technologies National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

²*Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia*

INFLUENCE OF WEAK ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE DYNAMICS OF POLYMER MACROMOLECULES

Following to [1-3], the paper looks at the processes of structure formation in polymers [1-3]. The behavior of macromolecules in electromagnetic fields of a low intensity is described. The interaction of a linear chain of monomers with an alternating electric field is considered. The characteristic frequency of oscillations for chains under the consideration are determined. Based on these evaluations, the spectrum of collective oscillations for macromolecule's chains is determined. It was shown that this external impact may be effected with the help of microwave radiation.

The possible technical solution of such impact is discussed. Proceeding from the Manley–Rowe relations [4], the analysis for the required resonant frequencies is carried out. Such approach makes it possible to determine the admissible relationships between characteristics for the radiation and absorbing medium. An analogy is developed between the coherent oscillations of macromolecules with a two-level quantum system obeying Bose-Einstein statistics [5]. Proceeding from this analogy, we find the conditions when the population of nonequilibrium states shall be maximum. Such information may be useful for experiments with the polymer medium under low-intensity electromagnetic perturbations.

Список литературы

1. Frolich H., Phys. Let., 29 A, 153 (1972)
2. Karnaukhov A.V., Ponomarev V.O. Dissipative resonance is a new class of physical phenomena. Some approaches to analytical description // Biomedical technologies and electronics. 2001. No. 8.
3. Karimov A.R., Shcheglov V.A. Role of weak energy fluxes in the formation of coherent structures in macromolecular media // Journal of Russian Laser Research. 2000. Vol. 21. № 6.
4. Trubetskov D.I. and Rozhnev A.G. Linear oscillations and waves. - Moscow: Physics and Mathematics Literature, 2001.
5. Baris F., Hu Ch., Nonlinear interactions of electromagnetic waves with biological materials, In Sat. Nonlinear electromagnetic waves, ed. Uslepci P., Moscow, Mir, 1983, p. 250.

ОБНОВЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ РАСЧЁТА ИМПЕДАНСА СВЯЗИ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОГО ТРАКТА BEAM IMPEDANCE 2D

При разработке источников синхротронного излучения большое внимание уделяется исследованию нестабильностей пучка, ограничивающих его эмиттанс и время жизни. Одним из источников нестабильностей является импеданс связи пучка с камерой. В данной статье описано проведённое обновление программы Beam Impedance 2D, ускоряющее расчёт резистивного импеданса камеры за счёт использования комплексного представления чисел и распределения расчётов между машинами вычислительного кластера.

V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY, V.I. RASHCHIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

BEAM IMPEDANCE 2D VACUUM CHAMBER COUPLING IMPEDANCE CALCULATION PROGRAM UPGRADE

During the synchrotron radiation source development much attention is paid to the study of beam instabilities, which limit its emittance and lifetime. One of instability sources is the beam coupling impedance. This article describes the upgrade of the Beam Impedance 2D program, which speeds up the resistive wall impedance calculation through the use of a complex number representation and the distribution of calculations between the nodes of the computational cluster.

Расчёт импеданса связи представляет из себя сложную задачу. Аналитические и полу-аналитические методы расчёта позволяют производить расчёты только аксиально-симметричных и плоских устройств в двухмерном приближении [1]. Расчёт трёхмерной задачи очень ресурсоёмок на высоких частотах.

В 2015 году U. Niedermayer представил программу BeamImpedance2D, позволяющую производить расчёт импедансов связи в двухмерных структурах без ограничений их геометрических характеристик [2]. В силу ограничений использованной библиотеки FEniCS [3] уравнения Максвелла, использованные при расчётах, были разделены на действительные и мнимые части. Программа была реализована в виде скрипта на языке Python.

Программа BeamImpedance2D была полностью переписана [4] на основе обновлённой версии библиотеки FeniCSx. Благодаря появившейся поддержке комплексных чисел, количество слагаемых решаемых уравнений сократилось с 49 до 14, что ускорило расчёт задач почти в 2 раза.

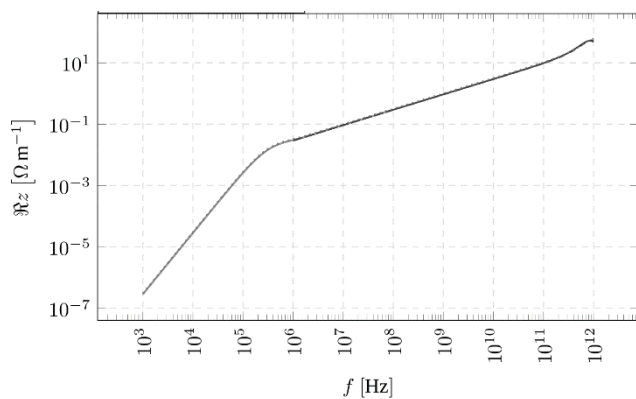


Рис 1. Продольный импеданс

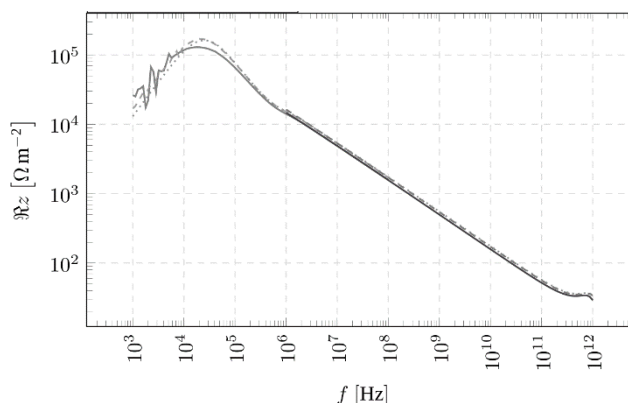


Рис 2. Поперечный импеданс

Программа расчёта реализована в виде библиотеки Python, что позволяет использовать функции расчёта как в отдельных скриптах, так и в блокнотах Jupyter. Программа поддерживает распределение расчётов на вычислительных кластерах при помощи стандарта MPI.

Список литературы

1. N. Mounet / ImpedanceWake2D // <https://bitbucket.org/cremlin-plus-wp4-task3/cloneiw2d/>
2. U. Niedermayer, O. Boine-Frankenheim, H. De Gerssem / Space charge and resistive wall impedance computation in the frequency domain using the finite element method // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams, Volume 18, 032001 (2015).
3. A. Logg, K.-A. Mardal, G. N. Wells et al. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method, Springer (2012).
4. С.В. Мациевский / BeamImpedance2DX // <https://gitlab.com/matsievskiy/bi2d>

В.С. ДЮБКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ И ИОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Для транспортировки низкоэнергетических протонов и ионов (наибольшее отношение атомной массы к заряду не более 3,2) от нескольких источников до входа в секцию линейного ускорителя с пространственно-однородной фокусировкой предложен магнитооптический канал, обеспечивающий коэффициент токопрохождения по всем зарядам более 92% и согласование пучков на вход ускоряющей секции с учётом влияния их собственного пространственного поля.

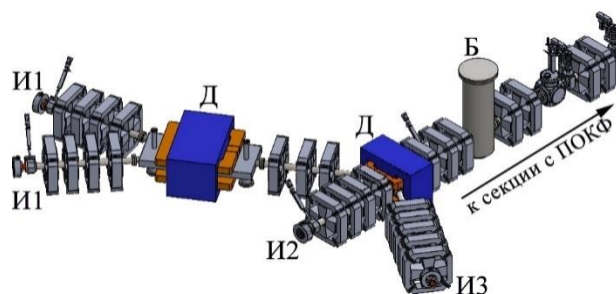
V.S. DYUBKOV

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

LOW ENERGY IONS TRANSPORT CHANNEL FOR A PULSED LINEAR ACCELERATOR

For a transportation and matching proton and light ion beams (the maximal value A/Z is about 3.2) between particle sources and RFQ section entrance it is suggested low energy ions transfer line. That line should provide more than 92% beam transmission and beam matching with its space charge.

Сегодня в Российской Федерации ведётся разработка и сооружение нескольких крупных ускорительных комплексов. Одним из них является крупный протонный и ионный синхротрон [1,2]. В качестве инжектора для этого синхротрона будут использованы два линейных резонансных импульсных ускорителя. Один из этих ускорителей ЛУ1 разрабатывается НИЯУ МИФИ и должен обеспечить ускорение протонов и лёгких ионов до энергии 7,5 МэВ/нуклон. ЛУ1 предусматривает два типа источников: ЭЦР на частоте 2450 МГц, для производства протонов и ионов гелия, и лазерный источник для производства лёгких ионов вплоть до Li. Для увеличения надёжности работы ЛУ1 лазерный источник дублирован. Для согласования пучков заряженных частиц и их транспортировки от источников до первой ускоряющей секции ЛУ1, которая представляет собой ВЧ резонатор с пространственно-однородной фокусировкой, разрабатывается магнитооптический канал LEVT (см. рис. 1).



И1 – лазерный источник, И2 – протонный источник, И3 – источник ионов He

Рис. 1. Канал транспортировки низкоэнергетических протонов и лёгких ионов.

LEVT должен предусматривать размещение блоков диагностики пучков (Д) и группирователя на частоте 81,25 МГц (Б). Для вывода ионов на ось ЛУ1 предлагается использовать дипольные магниты одинаковой конструкции. Энергия заряженных частиц будет составлять 40 кэВ/нуклон, импульсный ток 2 мА для ионов и 6,5 мА для протонов. Предложенный вариант магнитооптического канала низкоэнергетических протонов и лёгких ионов справляется с поставленной задачей.

Список литературы

1. Polozov S.M. et al. The conceptual design of the 7.5 MeV/u light ion injector // Proc. of RuPAC21, Alushta, Russia, 2021, P. 51-54.
2. Yurin I.A. et al. Light Ion Accelerator Magnets // Proc. of RuPAC21, Alushta, Russia, 2021, P. 390-392.

Е.Р.ХАБИБУЛЛИНА, В.И. НИКОЛАЕВ, В.С. СКАЧКОВ, Г.Н. КРОПАЧЁВ, Т.В. КУЛЕВОЙ
Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В КАНАЛЕ НЕВТ ТЯЖЕЛОИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Рассмотрен проект канала НЕВТ (High Energy Beam Transport channel), предназначенный для транспортировки пучка ионов с $A/Z = 4 \div 8$ и энергией 4 МэВ/нуклон от линейного ускорителя до обдирочной мишени для последующей инжекции пучка в бустер. Определены основные параметры магнитных квадрупольных линз, обеспечивающих поперечную фокусировку пучка и дебанчера, предназначенного для уменьшения импульсного разброса пучка с $\pm 0.8\%$ до $\pm 0.3\%$.

E.R.KHABIBULLINA, V.I. NIKOLAEV, V.S. SKACHKOV, G.N. KROPACHEV, T.V. KULEVOI
Kurchatov complex of theoretical and experimental physics, Moscow, Russia

BEAM DYNAMICS SIMULATION OF THE HEVT FOR THE HEAVY ION ACCELERATOR

The design of the HEVT (High Energy Beam Transport channel) for transportation of 4 MeV/u energy ion beam with $Z/A = 1/4 \div 1/8$ from linac to stripping target for injection into a booster is considered. The main parameters of magnetic quadrupole lenses providing beam transverse focusing and the debuncher to reduce the particles momentum spread from $\pm 0.8\%$ to $\pm 0.4\%$ are determined.

В ИТЭФ разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа. Канал НЕВТ предназначен для транспортировки пучков тяжелых ионов с $A/Z = 4 \div 8$ и энергией 4 МэВ/нуклон от линейного ускорителя (ЛУ) до обдирочной мишени и подготовки его кинематических характеристик к инжекции в бустер.

Магнитооптическая структура канала НЕВТ, состоит из трёх самостоятельных участков: Канал состоит из трёх самостоятельных участков:

- 1) «Регулярный» участок (Q5-Q8). Периодическая структура участка ФОДО. На входе в каждый период «регулярного» участка расчётные «параметры Твисса» повторяются;
- 2) Начальный участок (Q1-Q4) обеспечивает согласование «параметров Твисса» на выходе из ЛУ с «параметрами Твисса» на входе в «регулярный» участок;
- 3) Участок формирования (Q8-Q11) служит для фокусировки пучка на обдирочную мишень. Для увеличения возможности регулировки поперечного размера пучка, падающего на перезарядную мишень, в канал может быть добавлена дополнительная линза Q12.

Используя распределение магнитного поля квадрупольной линзы были определены ее основные параметры: максимальный градиент магнитного поля в линзе на участке согласования - 11.55 Тл/м (для Q1), для «регулярного участка» - 3.8 Тл/м; эффективная длина линзы – 295 мм. Конструкция линзы предполагает запас по увеличению градиента линзы до 20 Тл/м (около 40 %).

Для перевода пучка легких ионов, ускоренных в другом ЛУ, между квадрупольными линзами Q7 и Q8 предусмотрено место для установки дипольного магнита.

Для уменьшения импульсного разброса пучка на входе обдирочную мишень были определены место размещения и основные параметры двухззорного дебанчера: частота - 162.5 МГц, максимальная напряженность поля 4.65 МВ/м на зазоре, 17.5 МВ/м на поверхности. Внутренний радиус трубок дрейфа дебанчера составляет 25 мм, внешний – 45 мм, что позволяет транспортировать пучок с большим эмиттансом (до $0.9 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$). Дебанчер обеспечивает уменьшение импульсного разброса пучка с $\pm 0.8\%$ до $\pm 0.3\%$.

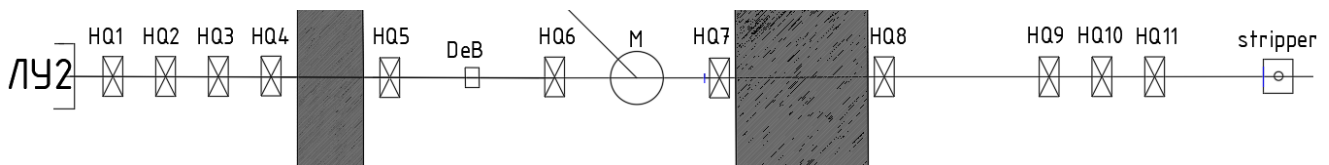


Рис. 1. Структурная схема НЕВТ, HQ1-HQ11 – квадрупольная электромагнитная линза; М – поворотный магнит; DeB – дебанчер; stripper – станция обдирки

А.В. ЗИЯТДИНОВА¹, П.А. ФЕДИН¹, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ¹, А.А. МАЛЬШЕВ¹, А.В. КОЗЛОВ¹, Т.В. КУЛЕВОЙ¹,
И.В. КИЛЬМЕТОВА^{1,2}

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ИОНОВ ГЕЛИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Современные тенденции разработки новых конструкционных материалов требуют усовершенствования существующих методов анализа. Новый тренд в имитационных экспериментах на реакторных сталях — это одновременное облучение двумя и более пучками ускоренных пучков ионов. Разрабатывается второй канал к существующему линейному ускорителю ТИПр, для реализации двойного облучения мишеней. В работе представлены результаты моделирования динамики пучка для второго канала, а также моделирование электромагнитных полей основных компонентов транспортной линии.

A.V. ZIATDINOVA¹, P.A. FEDIN¹, K.E. PRYANISHNIKOV¹, A.A. MALYSHEV¹, A.V. KOZLOV¹, T.V. KULEVOY¹, I.V. KILMETOVA^{1,2}

¹ National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

² National Research University “High School of Economics”, Moscow, Russia

HELIUM BEAM DYNAMIC SIMULATION FOR IMITATION EXPERIMENTS

Modern requirements for the development of new materials require an express method of analysis. A new trend in imitation experiments on reactor steels is the parallel emission of two or more accelerated ion beams. A second channel is under development to the existing linear accelerator HIPr for double beam irradiation. In this work, the simulation of the beam dynamics for the second beam channel was carried out, as well as the simulation of the electromagnetic fields of the main components for the transport line.

На ускорителе тяжелых ионов ТИПр с 2009 года ведутся имитационные эксперименты – облучение исследуемых образцов ускоренных пучков для имитации воздействия нейтронного воздействия [1]. Все более и более высокие требования к методикам экспериментов подтолкнули к модернизации существующей установки и строительству дополнительного канала для проведения облучения мишеней одновременно не одним, а двумя пучками ускоренных ионов. Имплантация водорода и гелия в дефекты, нарабатываемые пучком тяжелых ионов, позволяет моделировать процессы накопления продуктов трансмутации в реакторе. Разработка второго канала включает в себя моделирование системы транспортировки пучка от источника ионов к мишени. Результатом данной работы стала схема расположения электромагнитных элементов канала и фиксация параметров этих элементов, обеспечивающих требуемые параметры пучков легких ионов на исследуемом образце.

На выходе из источника ионов будет располагаться соленоид, который разрабатывается специально для данной работы. После соленоида располагается диагностическое и вакуумное оборудование, за ним – поворотный магнит (радиус поворота 670мм, угол поворота 34°, ширина рабочей области 20мм). Между диполем и мишенной камерой будут установлены 7 квадрупольных линз (3 линзы длиной 200мм и 4 линзы — по 400мм), а также ускорительная трубка на 300кВ.

Первоначальное моделирование проводилось в «идеальных» полях. Далее, построены модели соленоида, магнита, квадрупольных линз и электростатической трубки, и получены «реальные» поля, которые были использованы для более детального моделирования динамики пучка в разрабатываемом канале (см. рис.1). В работе представлены и обсуждаются результаты моделирования с «реальными».

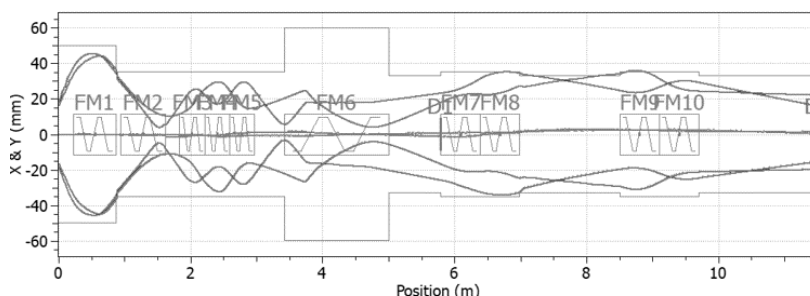


Рисунок 1 — Результат моделирования с «реальными» полями

Список литературы

1. Kulevoy T, Aleev A, Ivanov S, Kozlov A, Kropachev G, Kuibeda R, Nikitin A, Rogozhkin S, Semennikov A, Sharkov B and Zaluzhny A, 2009 Proceedings of International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, AP/P5-07 1-8

ОСНОВНЫЕ АРГУМЕНТЫ В ПОЛЬЗУ ПРОХОЖДЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СИНХРОТРОНА

Прохождение критической энергии требует особого внимания для сохранения устойчивости движения пучка при ускорении до энергии эксперимента. Рассмотрены возможные методы прохождения критической энергии в синхротроне на примере ускорительного комплекса NICA, расположенного в Дубне, Россия.

S.D. KOLOKOLCHIKOV, Yu.V. SENICHEV
Institute for Nuclear Research (Russian Academy of Science), Moscow, Russia

MAIN ARGUMENTS FOR CROSSING AND RAISING THE SYNCHROTRON TRANSITION ENERGY

The transition energy crossing requires special attention to preserve the stability of the beam during its acceleration to the energy of the experiment. Possible methods of the transition energy crossing in a synchrotron are considered as a case the NICA accelerator complex located in Dubna, Russia.

Критическая энергия (Transition Energy) представляет из себя важную характеристику синхротрона и зависит только от магнитооптической структуры самого ускорителя. При этом, если не предпринимать никаких мер, то в синхротроне развиваются нестабильности, которые в конечном счете ведут к потере пучка. В связи с этим применяют методы пересечения критической энергии.

Первый, метод, применимый в синхротронах по сей день стал метод создания быстрого скачка критической энергии при подходе к нестабильной области. Сам скачок может осуществляться быстрым изменением градиента квадрупольных линз, расположенных на арках синхротрона (Рис.1).

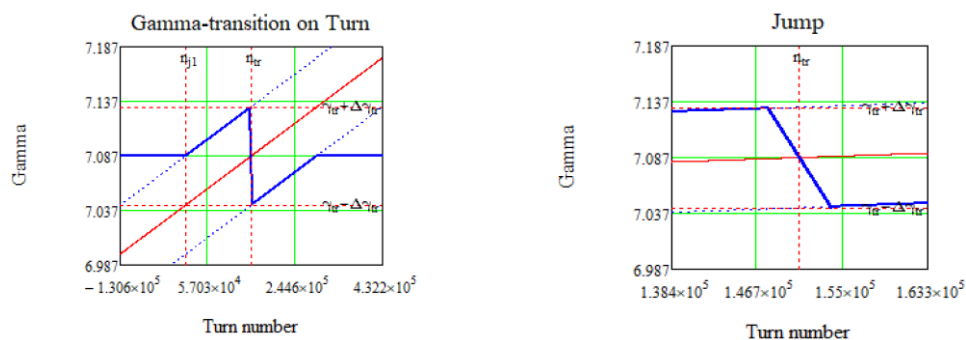


Рис. 1. Возможная принципиальная схема скачка критической энергии.

Второй распространённый метод – создание магнитооптической структуры с заведомо большим значением критической энергии, таким образом может пропасть необходимость прохождения критической энергии, так как она будет заведомо больше энергии эксперимента, при этом нестабильности, связанные с движением вблизи критической энергии, не возникают вовсе. Данный метод отличается тем, что необходимо внести изменение в саму магнитооптическую структуру синхротрона. Это возможно путем введения специальной суперпериодической модуляции градиентов квадрупольных линз на арках (Рис.2).

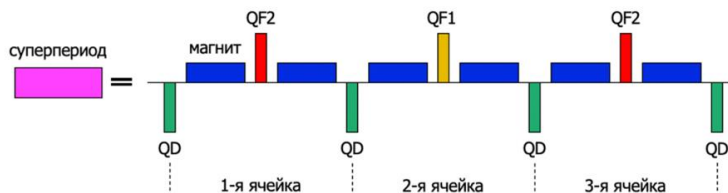


Рис. 2. Принципиальная схема одного суперпериода, состоящего из 3-х ФODO ячеек.

Список литературы

1. Syresin, E. M., Butenko, A. V., Zenkevich, P. R., Kolokolchikov, S. D., Kostromin, S. A., Meshkov, I. N., Mityanina, N. V., Senichev, Y. V., Sidorin, A. O., & Trubnikov, G. V. (2021). Formation of Polarized Proton Beams in the NICA Collider-Accelerator Complex. *Physics of Particles and Nuclei*, 52(5), 997-1017. <https://doi.org/10.1134/S1063779621050051> p22-26
2. Yu. V. Senichev and A. N. Chechenin. Construction of "Resonant" Magneto-Optical Lattices with Controlled Momentum Compaction Factor. ISSN 1063-7761 (2007).

А.А. МЕЛЬНИКОВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СПИНОВОЙ ДЕКОГЕРЕНТНОСТИ ПРОТОНОВ НА УСКОРИТЕЛЕ COSY

Для подготовки экспериментов по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) протонов на накопительном кольце ключевым этапом является оптимизация времени спиновой когерентности (SCT). SCT порядка тысячи секунд для дейтронов было экспериментально получено на COSY. В случае протонов, аномальный магнитный момент которых на порядок больше, необходимо тщательное исследование данного эффекта. В работе показано, что SCT зависит от хроматичности в обеих плоскостях и нелинейного коэффициента сжатия орбит. Эти параметры можно контролировать с помощью трёх семейств секступолей. Предложен алгоритм последовательной оптимизации SCT на ускорителе.

A.A. MELNIKOV, A.E. AKSENTEV, Y.V. SENICHEV

Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia

INVESTIGATION OF PROTON SPIN DECOHERENCE MECHANISMS AT COSY

For preparation of the experiments for proton electric dipole moment (EDM) search at a storage ring the key stage is optimization of spin coherence time (SCT). SCT in the order of thousand seconds has been achieved experimentally at COSY for deuterons. In the case of protons, with one order larger anomalous magnetic moment, detailed investigation of this effect is needed. It has been shown that SCT depends on chromaticity in both plane and nonlinear momentum compaction factor. These parameters can be controlled with three families of sextupoles. The algorithm is proposed for successive optimization of SCT at an accelerator.

Из решения нелинейных уравнений принципа автофазировки получается, что среднее значение энергии и спиновой частоты зависит от хроматичности $-\xi_{x,y}$ и нелинейного коэффициента сжатия орбит $-\alpha_1$ [1].

Вышеприведённая концепция была подтверждена в ходе численного моделирования. При этом SCT ($\bar{\tau}$) определяется следующей формулой: $\frac{\bar{\tau}}{T} = A|\xi_x - \xi_x^0|\varepsilon_x + B|\xi_y - \xi_y^0|\varepsilon_y + C|\alpha_1 - \alpha_1^0|\sigma_D^2$, где $\varepsilon_{x,y}$ – поперечные эмиттансы пучка, а σ_D – среднеквадратичный разброс по энергии. Контроль каждого из трёх параметров $-\xi_{x,y}, \alpha_1$ позволяет производить оптимизацию спиновой когерентности в каждой из трёх плоскостей независимо. Для этого необходимо использовать три семейства секступолей.

Влияние поперечного движения на SCT гораздо больше, чем продольного для охлаждённого пучка, поэтому первым этапом оптимизации SCT является нахождение оптимальных хроматичностей (рис. 1), а вторым – вариация $|\alpha_1|$ при фиксированных $|\xi_{x,y} = \xi_{x,y}^0|$ (рис. 2).

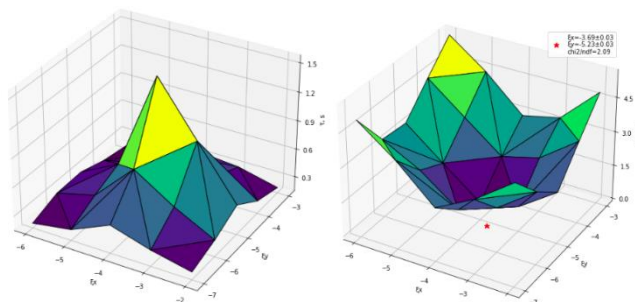


Рис. 1. Слева – зависимость SCT от хроматичностей при варьировании силы секступолей. Справа – то же для обратной величины, приведены оптимальные значения хроматичностей.

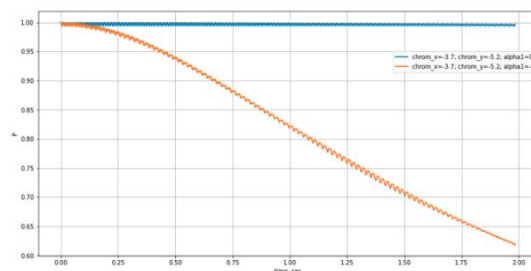


Рис. 2. Зависимость поляризации от времени при фиксированных оптимальных значениях хроматичностей, но различных значениях нелинейного коэффициента сжатия орбит.

Список литературы

1. Senichev Y.V. and others // proc. IPAC'13, paper WEPEA036, pp. 2579–2581.

ДИФФУЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ОБЕДНЁННОМ ЭЛЕКТРОНАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ СЛОЕ ФОТОКАТОДА

Построена простейшая диффузионная модель, позволяющая с некоторыми допущениями описывать заполнение электронами металлической подложки предварительно обеднённый полупроводниковый слой фотокатода.

M.V. VLADIMIROV¹, S.M. POLOZOV¹, V.I. RASHCHIKOV¹

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

A DIFFUSION MODEL FOR DESCRIBING RELAXATION PROCESS IN THE SEMICONDUCTOR ELECTRON DEPLETED LAYER OF A PHOTOCATHODE

The simplest diffusion model has been developed to describe, with some assumptions, the filling of the pre-depleted semiconductor film of the photocathode with metal substrate electrons.

В современных фотокатодах, применяющихся в ускорителях в качестве электронных инжекторов, активно используются полупроводниковые (п/п) структуры с высоким квантовым выходом, выращенные на металлических (Me) подложках [1]. При работе таких фотокатодов для получения интенсивных пучков используется внешнее ускоряющее электрическое поле. Его амплитуда велика настолько, что фотоэмиссионный ток электронов из п/п в вакуум существенно превосходит диффузионный ток из Me в п/п, в результате чего происходит стремительное обеднение электронами последнего, и он оказывается заряжен положительно. Учет наличия динамически изменяющегося заряда п/п слоя при моделировании фотопушек, позволил значительно улучшить согласие расчета с экспериментом [2]. Поскольку при полном истощении п/п слоя фототок отсутствует, представляет интерес изучение диффузии электронов из Me в п/п. Такой – релаксационный с точки зрения заполнения валентных состояний – процесс требует построения математической модели, способной адекватно его описывать.

Поставлена и аналитически решена 1D задача конвекции-диффузии для электронов в предварительно обедненном слое $x \in [0, a]$ п/п р-типа. Рассмотрен простейший случай в предположении отсутствия влияния дырок, фотоэффекта и постоянства коэффициента диффузии D , подвижности электронов μ и напряжённости электрического поля E внутри п/п слоя. На левой границе концентрация электронов известна: $n(0,t) = n_0$, на правой же – задан её градиент: $n'(a,t) = 0$. Начальная концентрация, говорящая о характере обеднения п/п слоя, учтена в общем случае: $n(x,0) = f(x)$.

Полученные выражения для $n(x,t)$, иллюстрации которых приведены на Рис. 1, позволили найти временную зависимость некомпенсированного заряда п/п слоя $q_+(t)$, а следовательно и характерные времена, за которые электроны Me будут его компенсировать.

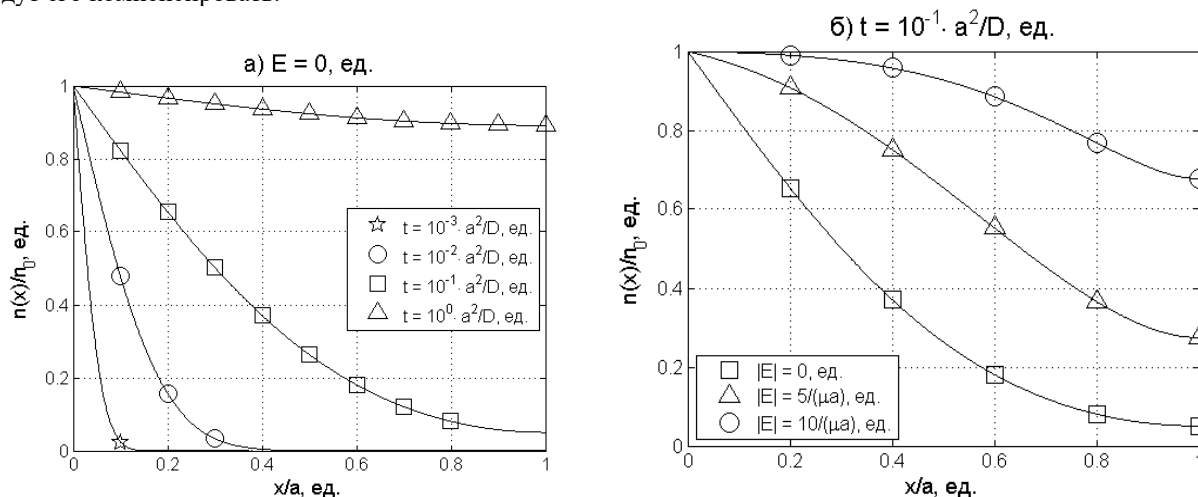


Рис. 1. Распределение концентрации электронов вдоль полупроводникового слоя $n(x)$: а) в различные моменты времени в отсутствие внутреннего электрического поля ($E = 0$) и б) в один момент времени при различных напряжённости поля

Список литературы

1. Teichert J. et al. Report on photocathodes. – 2004. – №. CARE Report-05-028-PHIN.
2. S.M. Polozov, V.I. Rashchikov, M.I. Krasilnikov, "An Improved Model for Photoemission of Space Charge Dominated Picosecond Electron Bunches: Theory and Experiment", in *Proc. 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21)*, Campinas, Brazil, May 2021, pp. 2829-2832. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB101

К.С. САГАН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНЫХ СВЯЗАННЫХ МОД И ЕЕ ПОРОГА В ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR С ПОМОЩЬЮ БИБЛИОТЕКИ PYHEADTAIL

Проведены расчеты динамики пучка в USSR для нулевого значения хроматичности в присутствии продольного и дипольного поперечного наведенных полей. Получена зависимость сдвига частот head-tail мод от тока пучка, по данной зависимости вычислен порог неустойчивости поперечных связанных мод.

K.S. SAGAN

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

STUDY OF TRANSVERSE TRANSVERSE COUPLING MODE INSTABILITY AND ITS THRESHOLD IN THE ULTIMATE SOURCE FOR SYNCHROTRON RADIATION (USSR) USING THE PYHEADTAIL LIBRARY

Calculations of the beam dynamics in USSR for zero chromaticity in the presence of longitudinal and dipolar transverse wake fields are carried out. The dependence of the frequency shift of head-tail modes on the beam current is obtained, and the instability threshold of transverse coupled modes is calculated from this dependence.

Неустойчивость поперечных связанных мод, называемая также head-tail неустойчивость, возникает из-за резонансного взаимодействия «хвостовой» части пучка с короткоживущим вейк-полем, наведенным его «головной» частью [1]. Из-за синхротронных колебаний «голова» и «хвост» пучка периодически меняются местами, что не дает развиваться неустойчивости при достаточно малом токе. При определенном пороговом токе происходит неограниченного нарастание амплитуды колебаний, приводящее к потерям частиц пучка

В работе рассмотрен подход к определению данной неустойчивости с точки зрения сдвига частот head-tail мод. Увеличение тока ведет к сдвигу данных частот и при пороговом токе частоты 0 и -1 моды становятся равными. Для вычисления этого порогового тока был проведен расчет динамики пучка при различных его интенсивностях с использованием библиотеки PyHEADTAIL [2]. Для каждого такого расчета после каждого оборота записывались следующие величины от $n = 0$ до $n = 10$: $M_{n,\perp} = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dz x \rho(z, x; t) z^n$, где x – горизонтальная координата, z – продольная, ρ – плотность распределения пучка. Далее проводился фурье анализ для каждого тока с использованием окна Хеннинга для лучшего разрешения частот. После объединения всех фурье-спектров получена зависимость сдвига частот head-tail мод от тока пучка, представленная на рис. 1.

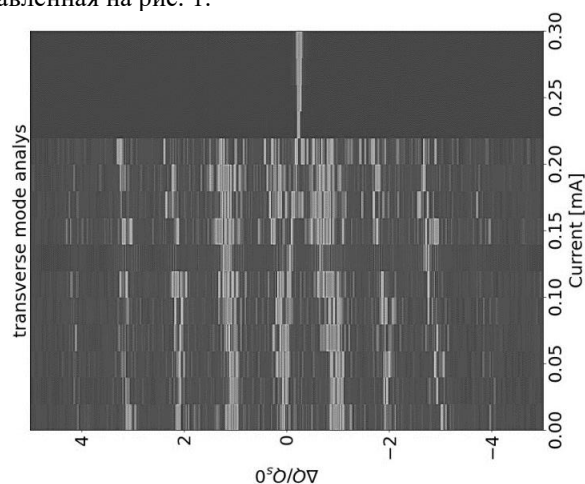


Рис. 1. Зависимость сдвига частот head-tail мод от тока пучка

Из графика следует, что пороговый ток равен порядка 0.2 мА.

Список литературы

1. Смалюк В.В. // Обзор коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА. 2012. Т.43. Вып. 2. С. 414-415.
2. Саган К.С. // Расчет порога микроволновой неустойчивости для источника синхротронного излучения четвертого поколения (ИССИ 4) с помощью библиотеки PyHEADTAIL языка программирования python. Сборник научных трудов VII Международной конференции «ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ЛАПЛАЗ-2021». Москва. 2021. С. 327-329.
3. E. Métral and M. Migliorati // Longitudinal and transverse mode coupling instability: Vlasov solvers and tracking codes. Phys. Rev. ST Accel. Beams 23. 2020. С. 6-10.

Д.А. ВАШЕТО, И.В. НОВИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ПРОВОДЯЩЕЙ СТРУКТУРЕ

Программой ECHO рассчитаны наведенные пучком поля в различных проводящих структурах, которые планируют использовать в проектируемом в настоящее время в РФ источнике синхротронного излучения четвертого поколения. Изучены принципы и особенности выбора оптимальных параметров моделирования для достижения необходимой точности при наименьших затратах ресурсов.

D.A. VASHETO, 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

The ECHO program has been used to calculate the beam-induced fields in various conducting structures, which are planned to be used in the fourth-generation synchrotron radiation source currently being designed in the Russian Federation. The principles and features of choosing the optimal modeling parameters to achieve the required accuracy at the lowest cost of resources are studied.

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 USSR. Переход к новому поколению источников синхротронного излучения влечет за собой увеличение рабочих энергий, уменьшение поперечного эмиттанса пучка, а также рост интенсивности заряда в самом пучке [1].

Последнее из вышеперечисленных обстоятельств приводит к тому, что растут неустойчивости пучка в системе, которые во многом определяются наведенными пучком в структуре ускорителя электромагнитными полями [1].

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 [1].

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 [2].

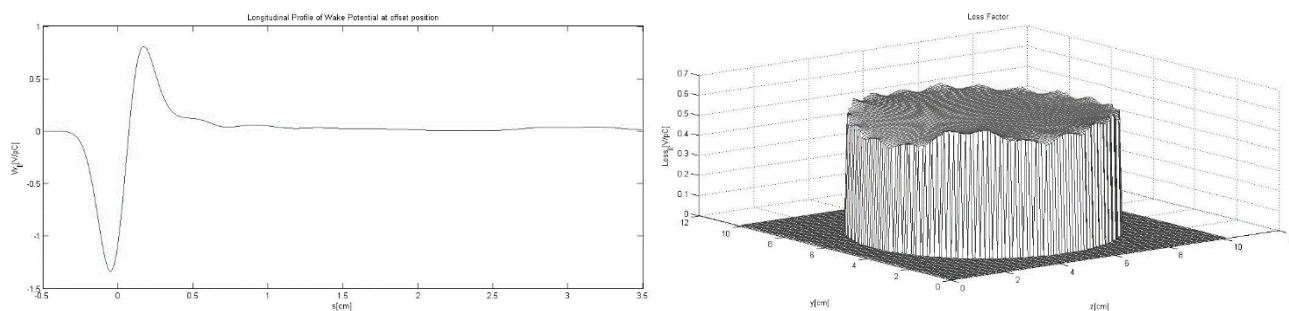


Рис. 1. Продольный след wake-потенциала и значения коэффициента потерь в поперечном сечении

Полученные в ходе расчетов wake-поля будут использованы для построения импедансной модели, необходимой для исследования неустойчивостей пучка.

Список литературы

1. Новиков И.В. Расчет электромагнитных полей, генерируемых электронным пучком в проводящей структуре с вращательной симметрией // Сборник научных трудов VII Международная конференция. - Москва, 2021. - С. 330-331.
2. I. Zagorodnov. Electromagnetic code ECHO. User's Manual. 2020

В.В.ПАРАМОНОВ
ИЯИ РАН, Москва, Россия

АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

В разработке проектов ускорителей заряженных частиц важным являются прогнозируемые и реализуемые характеристики изготовленных и настроенных ускоряющих резонаторов. В работе анализируются прогнозируемые характеристики двух ускоряющих структур, применимых для ускорения ионов низких энергий. Рассмотрение проводится от оценки характеристик периодической структуры, включает вопросы сегментации в резонаторы и настройки их, особенности технологии изготовления.

V.V. PARAMONOV
INR RAS, Moscow, Russia

ANALYSIS OF THE PREDICTED CHARACTERISTICS OF ACCELERATING CAVITIES FOR LOW ENERGY ION ACCELERATORS

In the development of projects for charged particle accelerators, it is important to predict and implement the characteristics of manufactured and tuned accelerating cavities. In the report the predicted characteristics of two accelerating structures, applicable to the acceleration of low-energy ions, are analyzed. The consideration is carried out from the evaluation of the characteristics of the periodic structure, includes the issues of segmentation into resonators and their tuning, the features and particularities of the manufacturing technology.

Для ускорения ионов в области низких энергий широко распространена Interdigital H (IH) структура [1]. Менее известна структура Split Ring, (SPR), [2]. Без внешней обечайки резонаторы с этими структурами показаны на Рис. 1а,б. Сравнение характеристик ускоряющих резонаторов на основе этих структур проведено для рабочей частоты 162,25 МГц и относительных скоростей ионов $\beta_1=0,057$ и $\beta_2=0,099$. Рассматривались идентичные для обеих структур трубки дрейфа с диаметром апертуры 10 мм и формой, оптимизированной как для условия $E_{\max}<1,3 E_K$ при темпе ускорения 2 МВ/м, так и для минимальной емкостной нагрузки при приемлемой величине поперечного электрического поля.

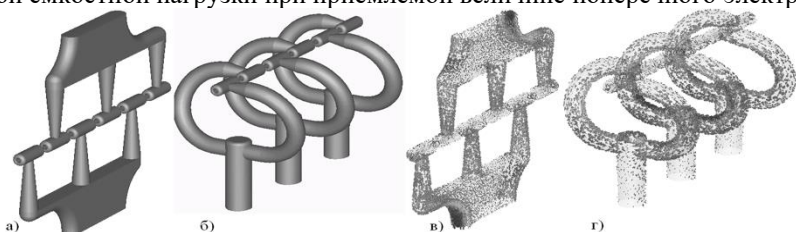


Рис.1. Структуры IH, (а) и SPR, (б). Распределение токов рабочего колебания по поверхности структур IH, (в) и SPR, (г).

Как регулярная периодическая структура, IH имеет неоспоримое преимущество по расчетной величине погонного шунтового сопротивления, $Z_{\text{сш}}=430$ МОм/м, β_1 , и 230 МОм/м, β_2 против 140 МОм/м и 160 МОм/м для SPR. Но при формировании короткого резонатора с равномерным распределением E_z , содержащего $n \sim 5$ трубок дрейфа, вносятся отличия от периодичности IH на торцах резонатора, Рис. 1а и ожидаемая оценка полного шунтового сопротивления резонатора как $Z_t = Z_{\text{сш}} n \beta \lambda / 2$ не реализуется. Для β_1 вместо ожидаемых $Z_t=90,5$ МОм, $n=4$ или $Z_t=136$ МОм, $n=6$ реализуется расчетные величины $Z_{tr}=43$ МОм, $n=4$ и $Z_{tr}=57$ МОм, $n=6$. Для β_2 отношение продольных и поперечных размеров резонатора больше и уменьшение Z_t менее существенно. При ожидаемых $Z_t=84$ МОм, $n=4$ и $Z_t=126$ МОм, $n=6$ реализуется величины $Z_{tr}=60$ МОм, $n=4$ и $Z_{tr}=76$ МОм, $n=6$.

Период структуры SPR является согнутым в кольцо полуволновым вибратором, на разомкнутых концах которого закреплены трубки дрейфа, Рис. 1б. Поля рабочей моды сосредоточены около дуг вибратора и трубок дрейфа. Держатель дуг находится под нулевым потенциалом. При построении SPR резонатора реализуемое Z_{tr} значительно ближе к ожидаемому. Для β_1 расчетные величины $Z_{tr}=32$ МОм, $n=4$ и $Z_{tr}=52$ МОм, $n=6$. Для β_2 $Z_{tr}=35$ МОм, $n=4$ и $Z_{tr}=52$ МОм, $n=6$.

Структура поля рабочего колебания SPR, распределение поверхностных токов и плотности ВЧ потерь по элементам резонатора обеспечивают преимущества при выборе элементов подстройки частоты и изготовлении резонатора в целом.

Список литературы

1. T. Weis et. al. Linear accelerators excited in TE111 mode. Proc. 1984 Linear Accelerators Conference, p. 417, Seeheim, Germany, <https://accelconf.web.cern.ch/l84/papers/thp0033.pdf>
2. A. Schempp et. al. A heavy ion post-accelerator with coupled spiral and split-ring resonators. Proc. 1979 Linear Accelerators Conference, p. 159, N.Y., USA, <https://accelconf.web.cern.ch/l79/papers/s3-6.pdf>

В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ

В настоящее время ускорители электронов широко применяются в досмотровых комплексах. Для работы этих комплексов требуется обеспечение двух режимов работы: с полной и с половинной энергиями пучка. Кроме того, для ускорения работы комплекса перестройка энергии должна выполняться как можно быстрее. В данной работе представлен анализ схемы питания ускорителя электронов на стоячей волне, позволяющей производить быструю перестройку энергии от импульса к импульсу.

V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY

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

LINEAR ELECTRON ACCELERATOR WITH PULSED ENERGY TUNING CHARACTERISTICS ANALYSIS

Nowadays electron accelerators are widely used in inspection systems. The operation of these complexes requires support of two modes of operation: with full and half beam energies. In addition, adjustment of beam energy must proceed as quickly as possible in order to accelerate the complex operation. This paper presents an analysis of the power supply scheme of a standing wave electron accelerator, which allows changing beam energy from pulse to pulse.

Ускорители, применяемые для целей инспекции грузов, должны обеспечивать режим двух энергий [1]. В известных установках перестройка энергии осуществляется изменением входной мощности и/или регулировкой тока пучка [2]. В настоящей работе рассмотрена возможность импульсной перестройки энергии изменением мощности, поступающей в секции.

В схеме, представленной ниже, перестройка энергии обеспечивается переключением мощности, поступающей в ускоряющие секции. На рис. 1: 1, 2 – ускоряющие секции со стоячей волной (биериодические ускоряющие структуры), 3 – питающий генератор, 4 – ферритовый циркулятор, 5 – фазовращатель, 6 – режекторный фильтр, работающий в импульсном режиме, 7 – поглощающая нагрузка.

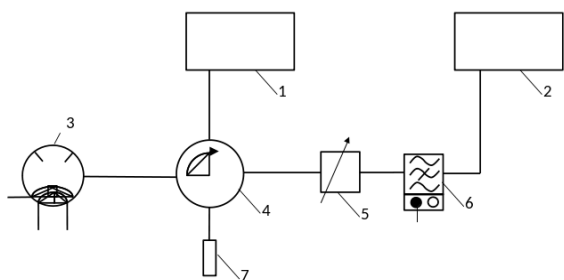


Рис 1. Схема ускорителя

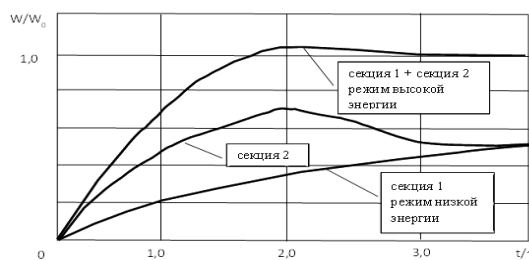


Рис 2. Переходный режим в секциях ускорителя

В режиме высокой энергии режекторный фильтр отключён, и мощность, отражённая от секции 1, поступает в секцию 2. При этом обеспечивается ускорение пучка до полной энергии. При включённом режекторном фильтре мощность отражается от него обратно в циркулятор и рассеивается в поглощающей нагрузке. На рис. 2 показаны кривые переходного режима в секциях ускорителя.

Как показали проведенные расчеты, при включённом режекторном фильтре резонансная частота ячейки ТТВ второй секции смещается на существенную величину, и вид колебаний $\pi/2$ не реализуется. Благодаря этому взаимодействие ускоренного пучка электронов с ячейками второй ускоряющей секции значительно уменьшается, и энергия пучка при прохождении через секцию не расходуется на возбуждение электромагнитного поля.

Список литературы

1. Ogorodnikov S., Petrunin V. / Processing of Interlaced Images in 4–10 MeV Dual Energy Customs System for Material Recognition // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams, Volume 5, 104701 (2002).
2. Завадцев А.А. и др. / Система инспекции грузов на основе дуального линейного ускорителя электронов // ПТЭ 2, 2011, с. 151-159.

А.А. КУЛИКОВ¹, А.О. МОРОЗОВ¹, А.В. ПРОКОПЕНКО²

¹ЗАО «НПП «Магратеп», Фрязино, Московская обл.

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МИКРОВОЛНОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Рассмотрены различные источники микроволнового излучения на основе волноводных ламп и магнетронных генераторов для использования в источниках ионов на основе микроволнового разряда в паровых и газовых средах. Изучена возможность использования магнетрона 2М246 для питания ЭЦР источников ионов с модернизированными источниками высоковольтного питания. Проведено исследование энергетических и частотных характеристик данного прибора от разработанных источников питания с возможностью регулировки СВЧ мощности. Подготовлены эскизный проект системы СВЧ-питания источника ионов.

A.A. KULIKOV¹, A.O. MOROZOV¹, A.V. PROKOPENKO²

¹Joint-stock Company 'NPP 'Magratep', Fryazino, Moscow reg.

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

MICROWAVE GENERATORS FOR ION SOURCES

Various microwave sources, based travelling-wave tubes and magnetron generators, for microwave discharge ion sources are considered. The possibility of using 2M246 magnetron to power the ECR ion sources with upgraded high-voltage power sources has been studied. The energy and frequency characteristics of this device from the developed power sources with the ability to adjust the microwave power are studied. A preliminary design of a microwave power supply system for ion source has been prepared.

Источники ионов на основе ЭЦР-разряда всегда вызывали большой интерес в ускорительной технике из-за их универсальности и возможности получения ионов высокой зарядности. Рассмотрены системы СВЧ питания различных источников ионов на основе ЭЦР разряда и показана необходимость работ на частотах более 10 ГГц для получения более тяжелых ионов с большим зарядом. Приведены и проанализированы конструкции систем СВЧ питания источников ионов на основе усилителей с лампами бегущей волны и с задающими генераторами на частотах от 11 ГГц до 18 ГГц, а также на основе магнетронных генераторов на частоте 2450 МГц. Показана возможность получения многозарядных легких ионов при использовании магнетронных генераторов.

Изучена возможность использования магнетрона 2М246 для питания ЭЦР источников ионов с модернизированными источниками высоковольтного питания. Разработан высоковольтный трансформаторный источник питания с возможностью регулировки мощности магнетрона изменением анодного тока. В источнике питания используется двух мостовая схема выпрямления с ведущим и ведомым от ЛАТРа трансформаторами. Исследована работа данного источника на магнетроне, являющимся нагрузкой с изменяемым активным и реактивным сопротивлением при изменении управляющего напряжения. Предложены методы сглаживания пульсаций и перевода работы источника с магнетроном из импульсного режима с частотой повторения 50 Гц в непрерывный режим.

Собран испытательный стенд для измерения характеристик магнетрона состоящий из коаксиально волноводного перехода магнетрона на прямоугольный волновод с сечением 86 мм на 43 мм, линейного волноводно переходника на сечение 90 мм на 43 мм, направленного ответвителя и согласованной водяной нагрузки с замкнутой системой охлаждения. С использованием векторного анализатора цепей определены коэффициенты переходного ослабления в дополнительном плече ответвителя в диапазоне частот от 2,43 ГГц до 2,48 ГГц для измерения мощности падающей волны. Используя разработанный источник питания, проведены исследования работы магнетрона при изменении анодного тока от 100 мА до 500 мА и сняты осциллограммы анодного напряжения и анодного тока, показывающие импульсный режим работы источника питания. С использованием направленного ответвителя и головки измерения мощности ваттметра измерительного Я2М-66 выполнено определение мощности при изменении анодного тока. Проведенные измерения показывают, что разработанный источник позволяет управлять генерируемой мощностью от 60 до 1100 Вт. Выполнены исследования частотных характеристик работы магнетрона при изменении анодного тока. Для исследований использовался анализатор спектра АКПП-4202, а сигнал снимался антенной, расположенной вблизи ввода высокого напряжения на катодную ножку магнетрона. Исследование показало, что с увеличением анодного генерируемая прибором частота увеличивается незначительно.

На разработанном стенде исследована работа магнетрона 2М246 со стандартным высоковольтным источником питания с однополупериодной схемой выпрямления и удвоением напряжения. Получено значение генерируемой мощности 786 Вт на частоте 2462 МГц. Проведено исследование работы магнетрона с использованием разработанного инверторного источника питания магнетрона со стабилизированным напряжением, которое показало, что при генерируемых мощностях до 400 Вт частотный спектр магнетрона неустойчив и расплывчат в диапазоне частот от 2,44 до 2,48 МГц. Также установлено, что по мере нагрева анодного блока магнетрона мощность прибора может падать на 5-7%.

Таким образом, в работе показана возможность использования магнетрона 2М246 для создания на его базе системы питания ЭЦР источника ионов, рассмотрены возможные системы питания этого прибора и определены особенности их работы.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КОМПАКТНОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ S-ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА УСТАНОВКИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕРАПИИ

Проведено моделирование бипериодической ускоряющей структуры. Представлены результаты оптимизации, а также рассчитаны электродинамические характеристики.

A.A. BATOV, R.A. ZBRUEV, M.A. GUSAROVA, M.V. LALAYAN
 National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

THE GEOMETRY OPTIMIZATION OF S-FREQUENCY RANGE COMPACT ACCELERATING STRUCTURE FOR THE RADIATION THERAPY FACILITY.

The biperiodic accelerating structure with on-axis coupling cells simulation is performed. Optimization results are presented and electrodynamic characteristics are calculated.

Для терапевтических комплексов с ускорителем электронов, положение в пространстве которого изменяется при работе, требуется создание компактной ускоряющей структуры. Предлагаемая для решения этой задачи ускоряющая секция на стоячей волне была спроектирована на базе бипериодической структуры с повышенным коэффициентом связи [1]. Секция состоит из группирующей (три периода) и регулярной (пять периодов) части. [2].

Настройка и оптимизация геометрии ячеек регулярной части проводилась на макете, состоящем из двух ускоряющих полужеек и ячейки связи. Значения коэффициента связи, эффективного шунтового сопротивления скорректированы изменением положения и площади окон связи. Результаты представлены ниже.

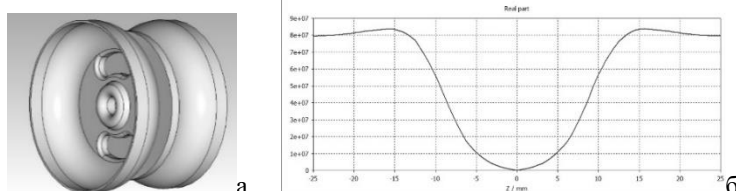


Рис.1. Геометрия регулярной ячейки (а) и распределение продольной составляющей электрического поля на оси ячейки (б)

Таблица 1. Электродинамические характеристики регулярной ячейки.

Параметр	Коэффициент связи	Частота	Добротность	Коэффициент перенапряженности	Эффективное шунтовое сопротивление
Значение	8,1%	2997,8 МГц	15313	2,28	79,2 МОм/м

Далее была проведена настройка группирующей. В соответствии с результатами расчета динамики пучка ячейки группирующей имеют относительные значения напряженности электромагнитных полей изменяющиеся в диапазоне от 0,4 до 1.

Проверка результатов была проведена на полной модели ускоряющей секции; при её построении оказалось необходимым уделить особое внимание и дополнительно скорректировать геометрию первой и последней ячеек. Результаты настройки и оптимизации представлены на рисунке 2 и в таблице 2.

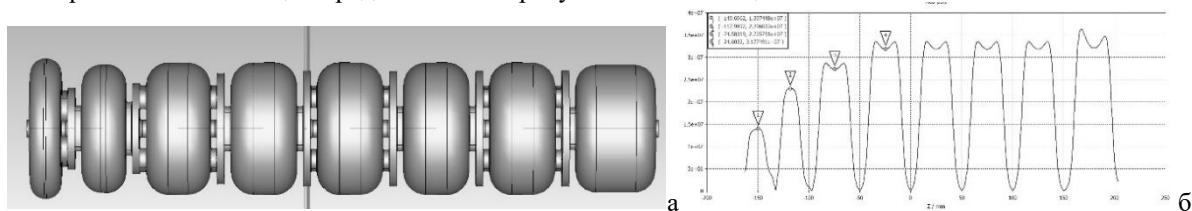


Рис.2. Геометрия структуры (а) и распределение продольной составляющей электрического поля на оси структуры (б)

Таблица 2. Электродинамические характеристики полной структуры.

Параметр	Коэффициент связи	Потери в структуре	Добротность	Коэффициент перенапряженности	Эффективное шунтовое сопротивление
Значение	9,84%	1,23 МВт	15296	2,66	70,52 МОм/м

Список литературы

- Gusarova M. A. et al. Biperiodic accelerating structure with inner coupling cells with an increased coupling coefficient //XXIII Всероссийская конференция ускорителей заряженных частиц. – 2012.
- M.V. Lalayan, A. Batov, M. Gusarova et al., Compact S-Band Accelerating Structure for Medical Application, in Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, 2021, pp. 186-188. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA4

Р.А. ЗБРУЕВ, А. А. БАТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

УСТРОЙСТВО ВВОДА МОЩНОСТИ ДЛЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ S-ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА УСТАНОВКИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕРАПИИ

Приведены результаты работы по проектированию ускоряющей структуры с устройством ввода мощности для установки радиационной терапии. Проведена настройка моделей, определены электродинамические характеристики.

R.A. ZBRUEV, A.A. BATOV

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

THE INPUT COUPLER OF S-FREQUENCY RANGE ACCELERATING STRUCTURE FOR THE RADIATION THERAPY FACILITY

Designing results of an accelerating structure with the input coupler for the installation of radiation therapy are presented. The models were adjusted, the electrodynamic characteristics were determined.

Для терапевтических комплексов с ускорителем электронов, положение в пространстве которого изменяется при работе, требуется создание компактной ускоряющей структуры. Предлагаемая для решения этой задачи ускоряющая структура на стоячей волне содержит три ячейки группирователя и пять регулирных ячеек [1]. Устройство ввода мощности служит элементом тракта передачи электромагнитного поля от источника СВЧ-питания к ускоряющей структуре через прямоугольный волновод сечением 72x34мм. К ячейке устройства ввода мощности также подсоединяется второй волновод сечением 34x34 мм, служащий для симметризации электромагнитного поля, также через него будет проводиться откачка системы.

Была разработана и смоделирована ускоряющая структура с вводом мощности, размещенным в пятой или седьмой ячейке.

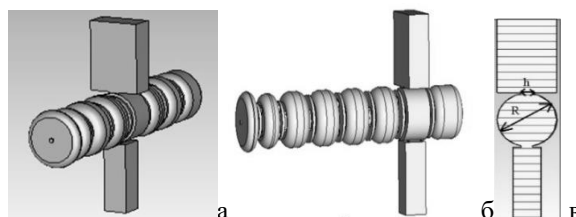


Рис. 1. Расчетные модели ускоряющей структуры (а, б – рассматриваемые варианты, в – параметры ввода мощности)

Значения оптимального коэффициента связи волновода с ускоряющей структурой β_0 и модуля коэффициента отражения S_{11} , при которых в заданном режиме связь будет критической, определяются соотношениями [2]:

$$\beta_0 = \left(\frac{I_0}{2} \sqrt{\frac{r_{sh_eff} L}{P_g}} + \sqrt{1 + \frac{I_0^2 r_{sh_eff} L}{4P_g}} \right)^2 \quad \left| S_{11} = \left| \frac{\beta_0 - 1}{\beta_0 + 1} \right| \right.$$

Для эффективного погонного шунтового сопротивления $r_{sh_eff} = 70.4$ МОм/м, длины структуры $L = 0,3665$ м, мощности генератора $P_g = 2.7$ МВт и тока $I_0 = 0.25$ А получены следующие значения коэффициента связи волновода и модуля коэффициента отражения: $\beta_0 = 2.127$, $S_{11} = 0.360$. Далее проводилась настройка моделей на рассчитанные значения. Результаты настройки представлены в таблице и на рисунке 2.

Таблица. Характеристики структуры и значения геометрических параметров настроенной структуры с вводом мощности.

№ ячейки с вводом	f , МГц	S_{11}	R	h
5	2999.5	0.359	36.08	13.76
7	2999.5	0.358	36.07	13.72

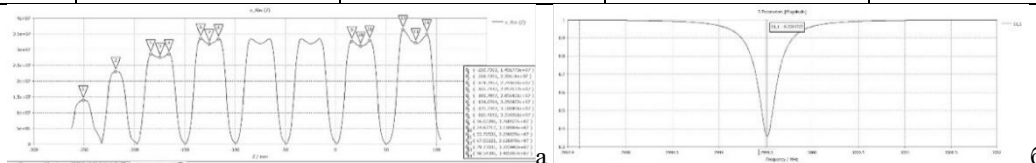


Рис. 2. Распределение продольной составляющей электрического поля на оси структуры (а) и зависимость модуля коэффициента отражения в полосе частот для структуры с вводом в седьмой ячейке (б)

Список литературы

- M.V. Lalayan, A. Batov, M. Gusarova et al., Compact S-Band Accelerating Structure for Medical Application, in Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, 2021, pp. 186-188. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA42
- Каминский В. И., Лалаян М. В., Собенин Н. П. Ускоряющие структуры и СВЧ устройства. – 2006.

ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ПЕТЛИ СВЯЗИ УСТРОЙСТВА ВВОДА МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ Н-ТИПА

В работе представлены результаты моделирования различных вариантов конструкции петли связи устройства ввода мощности для резонаторов Н-типа. Исследовано влияние геометрии петли на коэффициент передачи мощности.

М.М. BULGACHEVA¹, М.А. GUSAROVA¹

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

GEOMETRY SELECTION OF THE POWER COUPLING LOOP FOR H-TYPE CAVITIES

This paper considers H-type cavity power coupling loop design issues and provides the results of the modeling. The dependence of the coupling coefficient on the loop geometry is established.

Петля связи будет использоваться для передачи мощности из коаксиального кабеля с сопротивлением 50 Ом в резонатор Н-типа с рабочей частотой 81 МГц. В данной работе исследуются два варианта конструкции: плоская петля с прямоугольным поперечным сечением и цилиндрическая петля. Устройство ввода мощности ориентировано с учетом направления линий магнитного поля. [1]

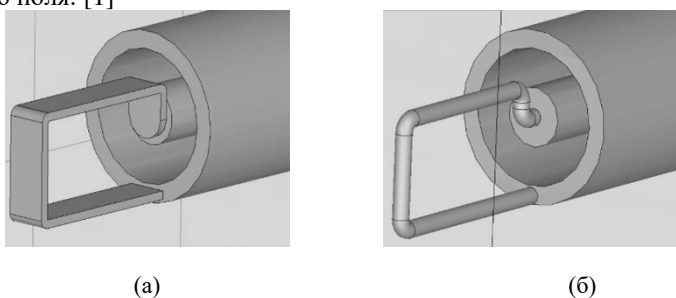


Рис. 1. Конструкция петли ввода мощности: а – прямоугольная; б – цилиндрическая

В работе рассмотрено влияние геометрических параметров петли связи на эффективность передачи энергии. Устройства ввода мощности были настроены на единичный коэффициент связи (критический режим). При исследовании выяснилось, что для достижения необходимого коэффициента связи прямоугольная петля должна иметь длину 82 мм, а цилиндрическая – 100 мм.

На рисунке 1 представлен график зависимости отражения (параметра S_{11}) от длины петли для двух вариантов конструкции устройства ввода мощности.

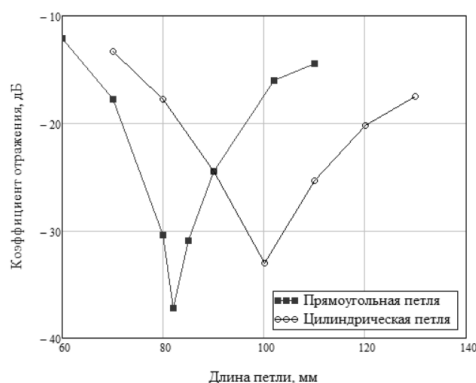


Рис. 2. Зависимость параметра S_{11} от длины петли

Также в работе было исследовано влияние формы петли на величину поверхностного тока. Выяснилось, что в местах перегиба прямоугольной петли наблюдаются локальные скачки тока. Для устранения этого эффекта в дальнейшем планируется сделать скругление большего радиуса.

Список литературы

1. Dôme G. // Basic RF theory, waveguides and cavities, CERN Accelerator School: RF Engineering for Particle Accelerators. Oxford, 1991, CERN 92-03, Vol. I (1992), pp. 1–96.

А.А. ГОРЧАКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СИСТЕМА ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ Н-ТИПА

Рассмотрены системы динамической подстройки рабочей частоты ускоряющего резонатора Н-типа. Получены зависимости рабочей частоты от глубины погружения подстроечного устройства для двух возможных вариантов размещения.

A.A. GORCHAKOV

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

FREQUENCY TUNING SYSTEM FOR H-TYPE STRUCTURES

Dynamic systems for adjusting the operating frequency of an accelerating resonator H-type are considered. The dependences of the operating frequency on the immersion depth of the construction device for two possible placement variants are obtained.

Воздействие внешних факторов на ускоряющий резонатор таких как, изменение температуры окружающей среды, воздействие электромагнитных полей, эффектов, возникающих в результате пролета пучка, оказывает влияние на изменение рабочей частоты. Для поддержания рабочих значений частоты ускорителя необходимо внешнее вмешательство. Для этого используются устройства динамической подстройки.

В работе рассматривались варианты размещения динамических плунжеров в ускоряющем резонаторе Н-типа, с рабочей частотой 80 МГц и относительной скоростью частиц 0,06 с [1]. Было предложено два варианта размещения под углом 45° и 30° к плоскости крепления трубок пролетного канала (рис. 1).

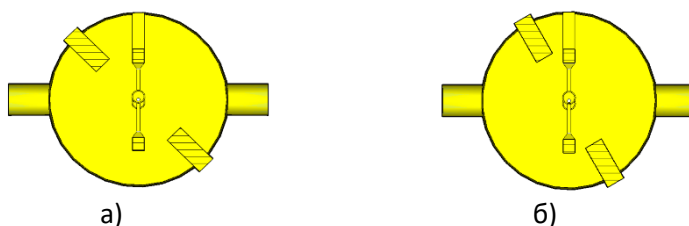


Рис. 1. Динамические плунжеры, расположенные под углом 45°(а) и 30°(б).

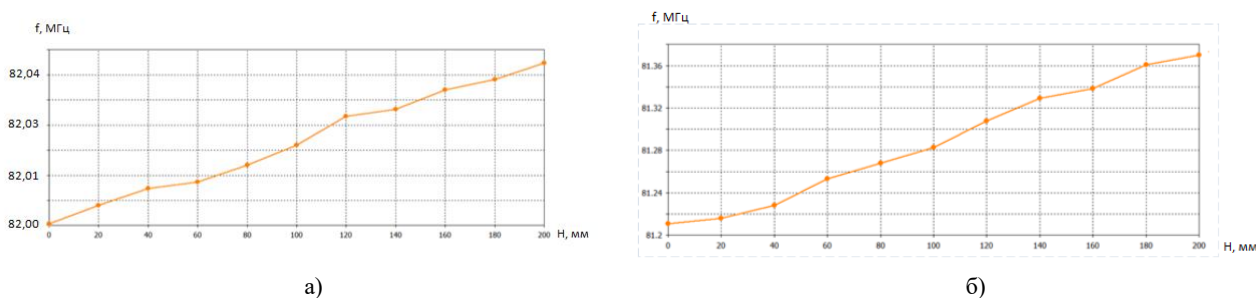


Рис. 2. Графики чувствительности изменения рабочей частоты от длины плунжеров расположенных под углом 45°(а) и 30°(б).

В случае крепления под углом 45° чувствительность составила 0,3 кГц/мм, а при 30° 0,5кГц/мм, приведены графики зависимости изменения рабочей частоты от глубины погружения подстроечного устройства (рис. 2).

Список литературы

1. А.А. Горчаков, М.А. Гусарова, М.В. Лалаян, С.Е. Топорков Разработка ускоряющих структур Н –типа // Proceedings of LaPlas 2021 P.404-405.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННОГО ECR ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕППЕР-ПОТ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЭМИТТАНСА

Ионные источники зачастую генерируют пучки, в которых кроме рабочего типа ионов присутствует спектр паразитных заряженных частиц, маскирующих основной ток и затрудняющих корректное измерение параметров источника, необходимое для расчета оптической системы на его выходе. В статье описывается методика выделения рабочего типа ионов из полного пучка источника с использованием системы измерения эмиттанса методом пеппер-пот, что позволяет оценить характеристики источника и определить оптимальный режим его работы.

S.V. BARABIN, D.N. SELESNEV, A.Y. LUKASHIN, P.R. ZENKEVICH, N.N. VINOGRADSKIY
National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

METHOD FOR CHARACTERIZING AN ECR ION SOURCE USING A PEPPER-POT EMITTANCE METER

Ion sources often generate a beams in which, in addition to the required type of ions, there is a spectrum of parasitic charged particles that mask the main current and make it difficult to correctly measure the source parameters necessary for calculating the optical system at the source output. The article describes a technique for separating the working type of ions from the total beam of the source using the pepper-pot emittance measurement system, which allows one to evaluate the characteristics of the source and determine the optimal mode of its operation.

Источники ионов зачастую генерируют пучок, содержащий спектр различных типов ионов. Спектр пучка ECR источника, показанный на рис. 1 (слева) кроме основных ионов гелия, содержит также и другие типы ионов. Эти паразитные ионы маскируют основной ток гелия, что затрудняет как измерение эмиттанса, так и определение оптимального режима работы источника. Стандартный способ сепарации рабочего типа ионов из тока пучка с источника – использование поворотного магнита. Однако, так как пучок с источника является сильно расходящимся, то для корректного измерения его параметров после поворотного магнита необходимо предварительно создать соответствующую оптическую систему, что требует предварительного определения эмиттанса пучка с источника.

Для измерения параметров ECR источника используется пеппер-пот измеритель эмиттанса [1-2], основными элементами которого являются медная маска с массивом $\varnothing 0.2$ мм отверстий с шагом 2.5 мм, сцинтиллятор, и видеокамера. При этом на сцинтилляторе формируется двумерное изображение распределения интенсивности излучения, на котором можно выделить изображения от ионов гелия и от паразитных типов ионов. Различие типов ионов на изображении можно идентифицировать по степени их расходимости, и изменению положения и поперечного размера пучков разных типов ионов при изменении режима работы источника. Аппроксимируя формы пятен излучения от ионов гелия гауссианами, и определив зависимости изменения размеров и положения пучка при изменении режимов работы источника, можно определить оптимальный режим работы источника и, с некоторой погрешностью, вычислить эмиттанс и twiss-параметры пучка ионов гелия.

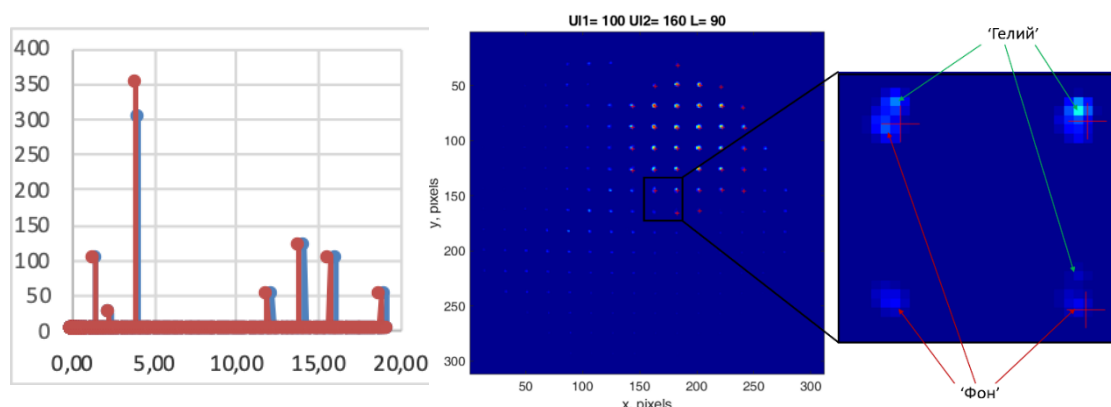


Рис. 1. Спектр источника ECR – слева. Справа – изображение излучения сцинтиллятора в пеппер-пот измерителе эмиттанса; выделена часть пучка, с ионами гелия и показаны области излучения от ионов гелия и от паразитных ионов.

Список литературы

1. S. Barabin et al. // 'Pepper-Pot Emittance Measurements', Proceeding of RUPAC2018, Protvino, Russia, 2018 pp. 443-445.
2. Barabin, S.V., Kropachev, G.N., Lukashin, A.Y. et al. Emittance Measurements of a Gasdynamic Electron Cyclotron Resonant Ion Source. Tech. Phys. Lett. (2021). <https://doi.org/10.1134/S1063785021050199>

Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ,
Т.В. КУЛЕВОЙ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»-ИТЭФ

ЛАБОРАТОРНЫЙ 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 много пучковое 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 гелия.

D. N. SELEZNEV, A.B. ZARUBIN, N.N. VINOGRADSKI, K.E. PRYANISHNIKOV,
T.V. KULEVOY

National Research Center "Kurchatov Institute" -ITEF

LABORATORY 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 helium 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 гелием.

Структурная схема лабораторного ЭЦР источника ионов представлена на рисунке 1.

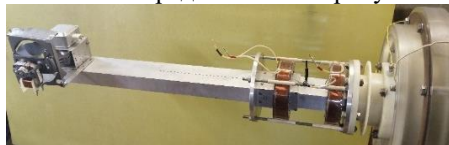
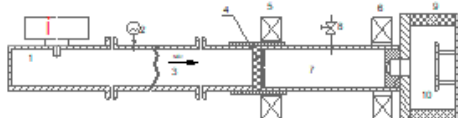


Рис. 1. Схема лабораторного ЭЦР источника ионов: 1-секция с магнетроном; 2- диодный детектор; 3- измерительная секция; 4- вакуумное высокочастотное окно; 5- магнитная катушка №1; 6-магнитная катушка №2; 7- разрядная камера; 8- ввод газа; 9- высоковольтный изолятор; 10- вакуумная камера с системой экстракции ионов.

Основные параметры ионного источника: частота СВЧ колебаний 2,45 ГГц; магнетрон LG 2M213; вид СВЧ колебаний Н10; габариты прямоугольного резонатора 72x34x580 мм; рабочий газ гелий. Ускоряющее напряжение 25 кВ. Величина магнитного поля в центрах магнитных катушек 1000 Гс.

Плазма в разрядной камере генерировалась импульсной СВЧ мощностью с частотой посылок до 2 Гц и длительностью импульса 1 мс. Источник устойчиво работал при давлении в вакуумной камере $p=2 \times 10^{-6}$ Торр несколько часов. Был измерен цилиндром Фарадея полный ток пучка ($I=7$ мА), измерен масс зарядовый состав пучка и нормализованный эмиттанс ($\mathcal{E}_n=1$ мм мрад). Интенсивности ионного пучка гелия 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

Е.Д. ВОВЧЕНКО, О.В. ДЕРЯБОЧКИН, К.И. КОЗЛОВСКИЙ,
Р.П. ПЛЕШАКОВА, А.Е. ШИКАНОВ, О.В. ЯКОВЛЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ

ОЦЕНКА ТЕРМОУСТОЙЧИВОСТИ МИШЕНИ ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ

В докладе рассмотрены особенности нагрева и деградации мишеней генераторов нейтронов с лазерным ионным источником. Предложенная расчетная модель учитывает импульсно- периодический режим нагрева и особенности, связанные с особенностями набивки мишени дейтерием. На основании результатов расчета даются рекомендации по минимизации фактора деградации.

V.D. VOVCHENKO, O.V. DERYABOCHKIN, K.I. KOZLOWSKII, R.P.PLESHAKOVA, A.E. SHIKANOV,
O.V. YAKOVLEV

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

ESTIMATION OF TARGET THERMAL STABILITY OF LASER NEUTRON GENERATOR

The features of heating and target degradation in neutron generators with a laser ion source are considered in this report. Pulse-periodic heating mode and features related to the target packing peculiarities with deuterium are taken into account by suggested calculated model. Minimization degradation factor recommendations are based on calculation results.

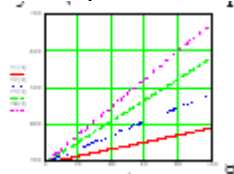
В работах [1-3] представлены результаты исследований проводимых в НИЯУ «МИФИ» по импульсным нейтронным генераторам (ИНГ) с лазерным источником дейтронов. Они говорят о возможности создания эксплуатационных приборов значительно превышающих по нейтронному выходу современные ИНГ за счет «магнитной изоляции» диодной системы, применения лазеров с энергией импульса излучения ~Дж [1] и мощных ГИН, обеспечивающих импульсную энергию потока дейтронов на мишень- W на уровне превышающем 10^2 Дж.

Эти мероприятия могут приводить к деградации мишени ИНГ в результате термодесорбции трития при ее нагреве дейтронным потоком.

Компьютерный анализ нагрева мишени проводился с использованием математической модели, базирующейся на приближенном дифференциальном уравнении термодинамического баланса:

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{fW}{C} - \lambda \frac{S_1}{C} (T - T_0) - \sigma \frac{S_2}{C} (T^4 - T_0^4),$$

где t - время, f - частота срабатывания ИНГ; C - теплоемкость подложки мишени; λ - теплопроводность подложки; $S_{1,2}$ - площади поверхности мишени и торца подложки, соответственно; σ - константа Стефана- Больцмана; T , T_0 - температура мишени и окружающей среды соответственно. На рисунке представлены результаты соответствующего компьютерного эксперимента для предполагаемого варианта ИНГ.



Результаты компьютерного моделирования:

$T_{1,2,3,4}(t)$ - расчетные зависимости температуры от времени, соответствующие частотам $f=1,2,3,4$ Гц, полученные при $W=140$ Дж для мишени с медной подложкой, имеющей теплоемкость $C=150$ Дж/К, для экспериментального ИНГ НИЯУ «МИФИ» с геометрией диодной системы, описанной в работах [1,2].

Как видно из графиков при $f > 2$ температура после 100 секунд работы ИНГ достигает предельного значения, при котором начинает эффективно десорбировать тритий из титановых и циркониевых мишеней, а при $f > 4$ и эрбиевых мишеней [4]. Поток трития из мишени в рабочий объем ИНГ можно оценить, по следующей формуле, получаемой после усреднения по распределению Больцмана:

$$Q_T(T) = n_T \sqrt{\frac{kT}{2\pi M_T}} \exp\left(-\frac{w}{kT}\right) S_1,$$

где n_T - концентрация трития в мишени, k - постоянная Больцмана, M_T - масса тритона, w - энергия его связи в металле-носителе.

При этом нейтронный выход ИНГ - $B(t)$ будет спадать во времени:

$$B(t) \approx A [n_T(0) S_1 \delta - \int Q_T(T(t)) dt],$$

где δ - толщина напыленного слоя металла- носителя мишени, A - константа пропорциональности. Для минимизации этого явления, согласно сделанным расчетам, следует увеличивать теплоемкость подложки нейтронообразующей мишени и площадь S_2 .

Список литературы

1. Anan'in O.B., Tsybin A.S., Shikanov A.E., Kozlovsky K.I. Atomic Energy, 2013, 115(2), p.137.
2. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I. Atomic Energy, 2016, 119(4), p. 258.
3. Shikanov A.E. Plasma Physics Reports, 2021, 47(4), p. 350.
4. Ключников А.А., Коломиец Н.Ф., Минчук Г.Я., Червинский В.Н. Принципы построения и применения металотритиевых структур. Киев, «Наукова думка», 1992, 215 с.

А.А. МАЛЫШЕВ^{1,2}, А.П. ФЕДИН², А.В. ЗИЯТДИНОВА², В.С.СКАЧКОВ²,
А.В. КОЗЛОВ², Т.В. КУЛЕВОЙ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОСНОВНОГО И ПРОЕКТИРУЕМОГО КАНАЛОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТИПР

Рассмотрены параметрические CST модели магнитных элементов разрабатываемого канала лёгких ионов и основного канала транспортировки тяжёлых ионов, исследованы характеристики сгенерированных полей, освещены особенности конструкции, влияющие на полученные распределения, предложены дальнейшие пути усовершенствования моделей.

A.A. MALYSHEV^{1,2}, A.P. FEDIN², A.V. ZIATDINOVA², V.S. SKACHKOV²,
A.V. KOZLOV², T.V. KULEVOY^{1,2}

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

² NRC “Kurchatov institute”, Moscow, Russia

MAGNETIC ELEMENTS OF THE MAIN AND DESIGNED CHANNEL IN LINEAR ACCELERATOR HIPR

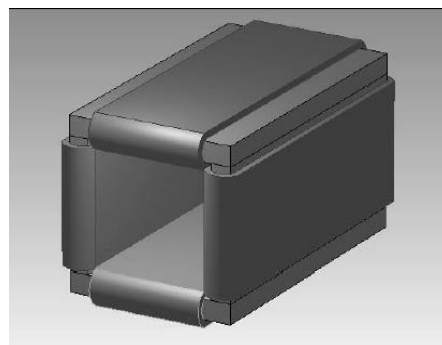
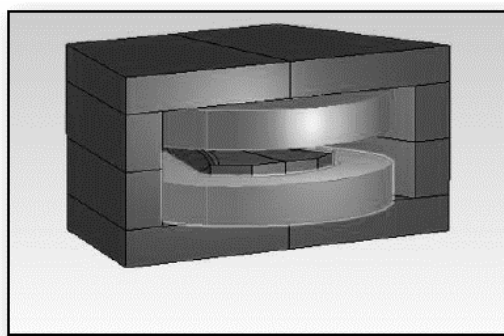
In this paper were considered parametrized CST models of magnetic elements that used in designed light ion channel and main heavy ion accelerator channel, distributions of produced magnetic fields were researched, covered construction qualities that have influence on obtained distributions, some improvements of model parameters also were purposed.

На тяжелоионном ускорителе ТИПр-1 проводятся эксперименты по имитации нейтронного воздействия на кон-струкционные материалы ядерных и термоядерных реакторов. Имитационные эксперименты на двух пучках ионов позволяют полностью моделировать процесс, происходящий в ядерных и термоядерных реакторах. Тяжелые ионы имитируют нейтронное воздействие, а имплантация ионов гелия повторяет процесс газового и вакансионного распухания в материалах реактора. Для проведения двухпучковых экспериментов на установке ТИПр-1 создается канал легких ионов, в состав которого входит раздаточный дипольный магнит.

Использование раздаточного магнита в проектируемой установке обусловлено ограниченностью пространства экспериментального зала, в связи с которой невозможно внедрить несколько каналов транспортировки пучка значительной протяженности. Разработанная в программном пакете CST параметризованная модель диполя с углом 34 градуса для транспортировки пучка легких ионов (H^+ , He^+) показана на рисунке 1 (а). Анализ характерных распределений полей, полученных в программе, позволяет изменять размеры ключевых элементов (магнитной апертуры, полюсов) для улучшения динамики в пролётном канале (минимизации потерь частиц пучка).

Для коррекции траектории движения пучка в канале транспортировке его от ускорителя до мишени требуется предусмотреть магнитный корректор. Модель корректора, представленного на рисунке 1 (б), разработана для коррекции траектории пучка ионов Fe^{2+} при транспортировке его от ускорителя до мишенного комплекса.

В работе представлены и обсуждаются результаты моделирования раздаточного магнита и магнитного корректора, разработанных для канала легких ионов ускорителя ТИПр-1



а) раздаточный магнит дополнительного канала б) магнитный корректор основного канала

Н.Ю. САМАРОКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Аннотация: В ходе данной работы была создана модель электронной пушки и рассчитаны магнитные поля внутри катодного электрода и их влияние на траекторию движения электронов

N.YU. SAMAROKOV

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

MODIFIED THERMIONIC ELECTRON SOURCE FOR LINEAR ACCELERATORS

Annotation: In the course of this work, a model of an electron gun was created and the magnetic fields inside the cathode electrode and their influence on the electron trajectory were calculated.

Подвод мощности к термоэмиссионной пушке обычно расположен параллельно оси пролета пучка, однако это значительно увеличивает продольные размеры источника. В связи с этим была рассмотрена возможность подведения питания к электронной пушке не параллельно, а перпендикулярно сокращая таким образом конечную длину ускорителя.

Была создана модель электронной пушки с двумя вариантами подвода питания, общие виды пушки с параллельным подводом питания и перпендикулярным приведены на рисунке 1 (а) и (б) соответственно.

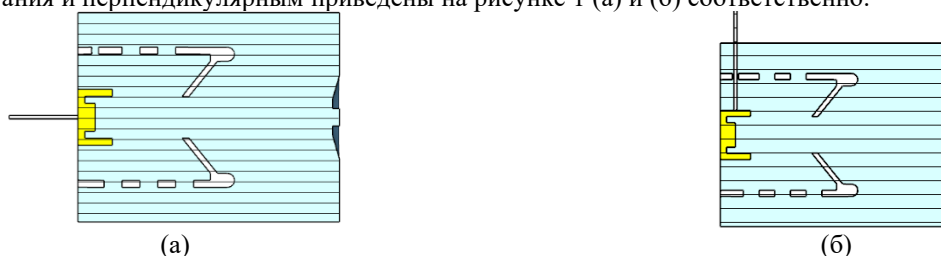


Рисунок 1 – Общий вид электронной пушки (а) с параллельным подводом питания и (б) с перпендикулярным подводом питания

Основным фактором, влияющим на выбор катодного электрода и соответственно возможность такого переноса питания пушки будет являться величина магнитного поля внутри катодного электрода и непосредственной близости от него, так как оно может захватывать вылетающие электроны и убирать их из последующего цикла ускорения. На величину магнитного поля внутри катодного электрода в первую очередь величина отверстий в нем. Но в то же время отверстия нельзя убрать совсем, так как они нужны для эффективной откачки газов из области катодного электрода.

На рисунках 2 (а), (б) представлены траектории пролета электронов в пушке с катодным электродом с 6 отверстиями радиуса 2,5 мм для параллельного и перпендикулярного подключения питания соответственно.

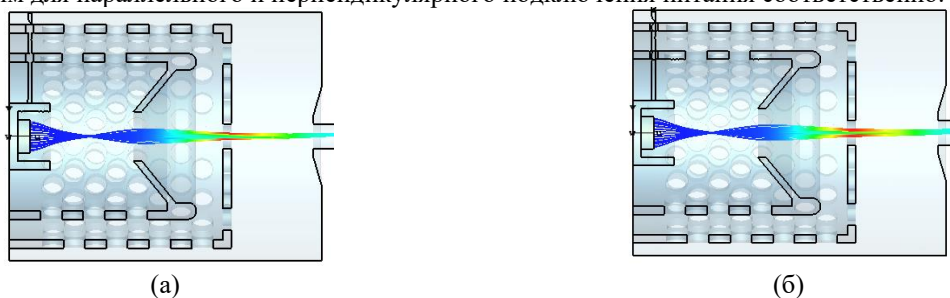


Рисунок 3 – Траектория полета электронов для (а) параллельного подключения и (б) перпендикулярного подключения

Из представленных выше расчетов видно, что подходит вариант катодного электрода с 6 отверстиями радиуса 2,5 мм, так как при рассчитанных значениях магнитного поля не происходит захват электронов.

Список литературы

1. Lalayan M. et al. Compact S-Band Accelerating Structure for Medical Applications //27th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'21), Alushta, Russia, 27 September-01 October 2021. – JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2021. – С. 186-188.

М.С.ДМИТРИЕВ, М.И.ЖИГАЙЛОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИОННОГО ЭЦР ИСТОЧНИКА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц

В работе было проведено моделирование магнитной системы ЭЦР источника ионов на постоянных магнитах с рабочей частотой 2,45 ГГц, предназначенного для получения протонов и слаботочных пучков двухзарядных ионов гелия. Рассмотрена конфигурация магнитной системы с различной формой постоянных магнитов и возможностью регулировки их положения для перестройки конфигурации магнитного поля. Проведено исследование конструктивных особенностей выбранных конфигураций, а именно магнитной силы магнитов в сборке. На основании результатов численного моделирования, а именно осевого и радиального распределений магнитного поля, а также формы ЭЦР области были определены две наиболее оптимальные конфигурации магнитной системы ионного источника для ЭЦР и СВЧ рабочих режимов.

M.S. DMITRIEV, M.I. ZHIGAYLOVA

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

SIMULATION OF THE ADJUSTABLE MAGNETIC SYSTEM OF A 2,45 GHz ECR ION SOURCE

The simulation of a magnetic system based on permanent magnets of ECR ion sources with operating frequency of 2.45 GHz for producing protons and low current double-charged helium ions has been carried out for. The configuration of a magnetic system with various shapes of permanent magnets and the possibility of adjusting their position to rebuild the magnetic field configuration is considered. The study of the design features of the selected configurations was carried out, the magnetic forces of the magnets in the assembly were calculated. Two most optimal configurations of the ion source magnetic system the for ECR and microwave operating modes were found. They are based on the numerical simulation results of the axial and radial distributions of the magnetic field as well as the shape of the ECR region.

В работе проводилось моделирование магнитной системы для ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц, предназначенного для получения протонов и слаботочных пучков двухзарядных ионов гелия. Профиль магнитного поля в плазменной камере важен как для обеспечения нагрева плазмы, так и для повышения надежности и стабильности работы источника. Для обеспечения работы источника как в СВЧ, так и в ЭЦР режиме предложены разновидности конфигураций перестраиваемой магнитной системы. Модель магнитной системы ЭЦР источника на 2,45 ГГц со сборным вариантом конфигурации постоянных магнитов показана на рис. 1. Длина гексаполюсного магнита была выбрана равной длине плазменной камеры – 100 мм, диаметр плазменной камеры – 50 мм. В системе имеется несколько соленоидов, обеспечивающих дополнительную регулировку значений поля в области инжекции и экстракции B_{inj} и B_{ext} , соответственно.

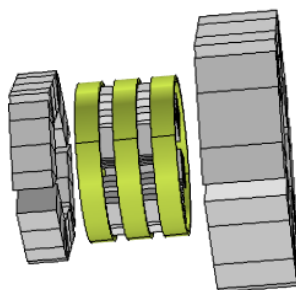


Рис. 1. Магнитная система ЭЦР источника на частоту 2,45 ГГц.

Проведенные расчеты включают исследование изменения характеристик системы (распределения магнитного поля по оси Z, радиального распределения магнитного поля, значений поля на границе камеры, значений максимумов осевого распределения поля в области инжекции и экстракции) для различных вариантов геометрии магнитной системы, выполненной из неодимовых магнитов. Исследовано изменение характеристик магнитного поля и положение ЭЦР области при перестройке конфигурации для различных режимов работы. Определено оптимальное положение элементов магнитной системы исходя из оптимума распределения магнитного поля.

Для обоих вариантов геометрии магнитной системы были рассчитаны значения магнитных сил неодимовых магнитов.

Список литературы

1. M. Dmitriyev et al., "Magnetic System With Variable Characteristics for a 2.45 GHz ECRIS", presented at the 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC'21), Alushta, Russia, September 2021, paper TUPSB38.
2. M. S. Dmitriyev et al., "Magnet System for a Proton/helium ECR Ion Source", presented at the 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21), Campinas, Brazil, May 2021, paper WEPAB191.

И.В. КИЛЬМЕТОВА, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, Ю.Б. СТАСЕВИЧ, А.В. ЗИЯТДИНОВА,
П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА ЛЕГКИХ ИОНОВ

Ионный ускоритель — это многофункциональный инструмент, который может быть использован, в том числе, для моделирования эффектов нейтронного облучения реакторных материалов. В ИТЭФ ускоритель тяжелых ионов ТИПр (тяжело-ионный прототип) используется для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах. Для моделирования воздействия на реакторные материалы продуктов ядерных реакций, необходимо в область создаваемых повреждений имплантировать водород и гелий. В работе рассматривается создание соленоида, используемого для фокусировки пучка ионов гелия из ЭЦР источника, и способ его электропитания.

I.V. KILMETOVA, A.V. KOZLOV, T.V. KULEVOY, YU.B. STASEVICH, A.V. ZIATDINOVA, P.A. FEDIN,
K.E. PRYANISHNIKOV

National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

THE DESIGN OF AN AXISYMMETRIC ELECTROMAGNETIC LENS FOR FOCUSING A LIGHT ION BEAM

Ion accelerator facility is a powerful tool to simulate neutron irradiation effects in reactor materials. At the IТЭF the heavy-ion accelerator HИPr (heavy ion prototype) is used for the of radiation damage simulation in steels and alloys by ion beams. Helium and hydrogen ion beam implantation in heavy ion damaged area can be used to simulate transmutation effects occur in reactor materials. The report considers the design of a solenoid used for focusing a beam of helium ions from an ECR source, and the solenoid power supply.

Ионный ускоритель — это многофункциональный инструмент, который, в том числе, может быть использован для моделирования эффектов нейтронного облучения в реакторных материалах. Ускоритель тяжелых ионов ТИПр (тяжело-ионный прототип) используется для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах. Облучения ведутся в основном ионами железа Fe^{2+} , но при необходимости могут быть использованы и пучки ионов ванадия, тантала, углерода и многие другие. Облученные образцы исследуются методами атомно зондовой томографии (АЗТ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Для моделирования воздействия на реакторные материалы продуктов ядерных реакций, необходимо в область создаваемых повреждений имплантировать водород и гелий. Это позволит проводить исследование такого важного процесса как радиационное распухание материала под воздействием радиационного облучения. Сейчас ведутся работы по созданию второго канала установки ТИПр для проведения одновременного облучения пучками тяжелых ионов и ионов водорода/гелия [1]. В работе рассматривается создание соленоида, используемого для фокусировки пучка ионов гелия из ЭЦР источника [2], и способ его электропитания.

В данной работе проведено моделирование конструкции соленоида и схемы генератора его импульсного питания для заданных параметров магнитного поля и рабочей области. Для этого рассчитаны необходимое количество ампер-витков и основные параметры обмотки соленоида, а также определены параметры колебательного контура (Рис. 1), включая величину необходимой мощности источника тока, функционирующего в режиме рекуперации энергии, накопленной в индуктивной нагрузке. Расчеты выполнены для 6 вариантов соленоида: исполнение обмотки с количеством слоев $2 \div 4$ проводом ПЭЛ-2 и ПБД 5×3 мм². Для всех вариантов был проведен расчет температуры соленоида в установившемся режиме работы. На основании проведенных расчетов выбран вариант 4-слойного соленоида с намоткой, выполненной проводом ПЭЛ-2.

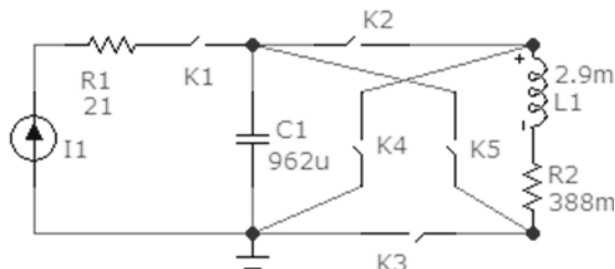


Рис. 1. Модель источника электропитания соленоида с учетом рекуперации в программе Micro-Cap

Список литературы

1. P.A. Fedin et al. 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1686 012073 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1686/1/012073>.
2. Селезнев Д.Н., Зарубин А.Б., Кузьмичев В.Г., Кулевой Т.В. ЭЦР-источник легких ионов // Сборник трудов VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2021». – Москва, 2021

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ И ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Разработана система экстракции и формирования пучка ионов с возможностью продольного перемещения системы электродов относительно плазменного электрода для ЭЦР источника с рабочей частотой 2,46 ГГц. Проведена оптимизация фокусирующей электростатической линзы. Выполнено моделирование динамики пучков протонов и ионов He^{2+} в источнике.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, O.A. IVANOV, A.S. KRASNOV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

OPTIMIZATION OF BEAM EXTRACTION AND FORMATION SYSTEM FOR ECR ION SOURCE

The beam extraction and formation system for ECR ion source with the operating frequency of 2.46 GHz has been developed. It provides the possibility of longitudinal movement of the electrode system relative to the plasma electrode. The focusing electrostatic lens has been optimized. The simulation of the beam dynamics of protons and He^{2+} ions in ECR ion source extractor is performed.

Разработана система экстракции и формирования пучка ионов ЭЦР источника с рабочей частотой 2,46 ГГц, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ, предназначенного для получения протонов и ионов He^{2+} . Система построена на основе квазипирсовской системы электродов и электростатической линзы. Предусмотрена возможность продольного перемещения системы электродов, обеспечивающая юстировку положения извлекающего электрода относительно магнитной системы и плазменного электрода. Выполнено моделирование полной электростатической модели, включающей в себя как систему экстракции пучка, состоящей из плазменного электрода, извлекающего электрода и электростатической линзы, так и вакуумной камеры имеющих на своих стенках потенциал плазменного электрода, что вносит значительные коррективы в разработанную ранее систему [1].

Выполнялась оптимизация параметров плазменного электрода, наконечника извлекающего электрода экстрактора, потенциалов и геометрии электродов электростатической линзы. В расчёте учитывалось так же влияние фланца вакуумной камеры, находящийся под потенциалом плазменного электрода (рис. 1, поз. 5).

По результатам оптимизации параметров извлекающей системы проведена корректировка геометрии элементов системы и напряжений на электродах. Выполнено моделирование динамики пучков протонов и ионов He^{2+} в источнике (рис. 2).

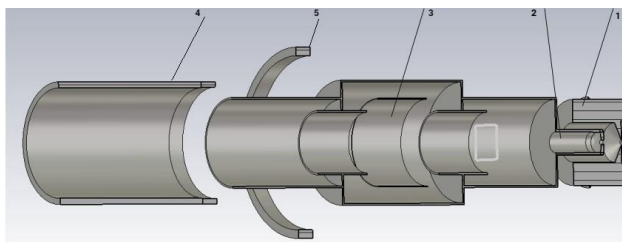


Рис. 1. Схема экстрактора: 1 – плазменный электрод, 2 – извлекающий электрод, 3 – электростатическая линза, 4 – электрод под потенциалом земли, 5 – фланец стенки вакуумной камеры.

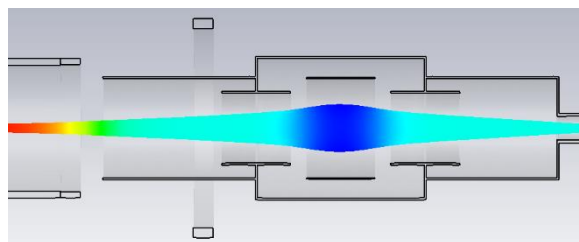


Рис. 2 Траектории пучка ионов He^{2+} в экстракторе.

Корректировка параметров модели позволила увеличить фокусное расстояние системы на 200 мм. Электростатическая линза выполнена единым блоком с извлекающим электродом, что позволяет легко осуществлять продольное перемещение и настройку взаимного положения электродов.

Список литературы

1. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А.// VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021». Сборник научных трудов. Москва, 23–26 марта 2021 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 388-389.

РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА ДЛЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,46 ГГц

Разработан волноводный тракт для ионного источника на электронно-циклотронном резонансе на рабочую частоту 2,46 ГГц. Произведено численное моделирование основных элементов тракта. Проведена оптимизация трехшлейфового штыревого согласователя, позволяющего согласовать нагрузку с источником СВЧ-мощности, и волноводного разрыва по постоянному току, рассчитанного на постоянное напряжение 80 кВ.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, S.A. TUMANOV
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF WAVEGUIDE PATH FOR 2,46GHz ECRIS

A waveguide path for 2,46 GHz ECRIS has been developed. Numerical simulation of the main elements of the tract has been performed. Optimization of a triple-stub tuner to provide the load-source impedance matching for the microwave power source and DC break at 80 kV has been carried out.

Разработан волноводный тракт для ЭЦР источника ионов с рабочей частотой 2,46 ГГц. Схема питания источника представлена на рис. 1. Основными элементами системы питания являются магнетрон 1 с источниками питания 9 и 10, коаксиально-волноводный переход 2, ферритовый вентиль 3, трехшлейфовый штыревой согласователь с ручной регулировкой 4, разрыв по постоянному току (DC break) 5, баночное окно ввода мощности 6, волноводный переход 7 и рабочая камера 8.

Для создания системы СВЧ питания малогабаритного ЭЦР источника с рабочей частотой 2,46 ГГц проведена оптимизация трехшлейфового штыревого согласователя [1]. Согласователь выполнен на основе волновода стандарта WR-340, в котором располагаются три емкостных штыря в виде металлических цилиндров диаметром 14 мм, размещенных на оси широкой стенки волновода на расстоянии четверти длины волны в волноводе. Глубина погружения штырей регулируется от 0 мм до 40 мм. Показано, что с использованием согласователя для произвольной нагрузки может быть обеспечено значение КСВН до 1,05.

ЭЦР источник располагается на высоковольтной платформе, что осложняет его эксплуатацию, обслуживание и контроль параметров. Решением этих проблем будет размещение СВЧ генератора и основных узлов системы СВЧ питания на потенциале земли. При этом для передачи СВЧ мощности в плазменную камеру источника используется DCbreak, играющий роль изолятора между высоковольтной платформой, на которой располагается источник ионов и генератором СВЧ мощности [2]. Разработана конструкция DC-break, показанная на рис. 2, представляющая собой дроссельное соединение двух прямоугольных волноводов WR-340 с фторопластовым изолятором. Согласно выполненным оценкам, DC-break может выдержать напряжение до 240 кВ.

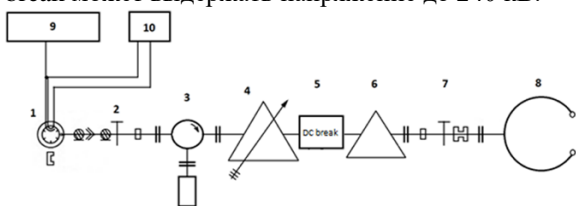


Рис. 1. Схема СВЧ питания источника.

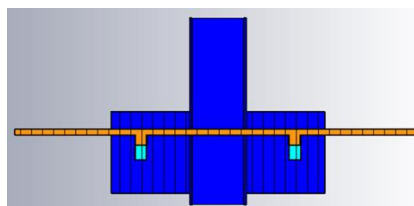


Рис. 2 Расчетная модель DCbreak.

Разработан волноводный переход с прямоугольного волновода на H-образный сечением 43x12 мм.

Список литературы

1. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021». Сборник научных трудов. Москва, 23–26 марта 2021 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 427-428.
2. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021». Сборник научных трудов. Москва, 23–26 марта 2021 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 392-393.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОТКАЧКИ КОМПАКТНОГО ЛУЭ

Рассмотрены особенности построения системы откачки вакуумной структуры компактного медицинского ЛУЭ. Даны оценки требований к уровню вакуума, приведены данные по вакуумным свойствам конструкционных материалов и применяемым технологиям вакуумного обезгаживания. С использованием 3D модели вакуумной части ЛУЭ выполнено численное моделирование распределения давления вдоль структуры при откачке встроенным ионным насосом.

A.S. PANISHEV, S.M. POLOZOV, V.L. SHATOKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A COMPACT ELECTRON LINAC PUMPING SYSTEM

The features of the pumping system of the vacuum structure of the compact electron linac for medical applications are considered. The requirements for the vacuum level are described. Information on the vacuum properties of constructional materials and the vacuum outgassing technologies used are given. Using a 3D model of the vacuum part of the linac, a numerical simulation of the pressure distribution along the structure during pumping out by a built-in ion pump was performed.

Для обеспечения нормальных рабочих условий ускорителя необходимо создание высокого вакуума в области генерации и ускорения пучка электронов. Вакуумная среда минимизирует столкновения электронов с молекулами остаточного газа, что могло бы привести к разрушению пучка. Также вакуум необходим для поддержания электрической прочности между элементами ускоряющей структуры, увеличения ресурса термокатода.

Устойчивость вакуума ЛУЭ связана с тепловыми и радиационными нагрузками на внутренние вакуумные поверхности, приводящими к усиленному газовыделению с поверхностей и динамическому росту давления в рабочем объеме ускорителя. В целях снижения данных эффектов необходима тщательная обработка поверхностей, направленная на их обезгаживание, включающая процедуры очистки, полировки поверхностей и тепловую тренировку. Тренировка в рабочих условиях постепенно приведет к стабилизации вакуумных условий и умеренному колебанию давления в рабочих режимах. Предполагается, чтобы обеспечить некоторый запас по давлению, вакуумная система должна создавать устойчивое остаточное давление на уровне не хуже $1 \cdot 10^{-6}$ Па.

Корпус ускорителя выполнен вакуумноплотным, собранным из ячеек ускоряющей структуры и катодного узла. Ячейки резонаторной структуры изготавливаются из бескислородной меди. Сборка структуры производится пайкой секций под вакуумом при высокой температуре. Указанные технологии позволяют снизить скорость газовой выделенности с поверхности волноводов до уровня 10^{-7} мЗ·Па/с/м². Вакуумная тренировка и обезгаживание структуры выполняются при установке ускорителя на откачном посту, с помощью высоковакуумных безмасляных средств откачки. К таким средствам откачки относятся турбомолекулярный и спиральный насосы. После снятия с вакуумного поста высокий остаточный вакуум в изолированной структуре будет обеспечиваться подключенными к вакуумной камере ускорителя компактными магнитными электроразрядными насосами. Дальнейшее снижение потока десорбции обеспечивается работой ЛУЭ в начальный период эксплуатации на пониженном в 2–3 раза, по сравнению с номинальным, уровне ВЧ-мощности.

Для структуры проектируемого ЛУЭ в системе CAD была создана трехмерная модель [1], по которой далее была получена модель вакуумного объема. В состав вакуумной модели входят ускоряющая структура, объем камеры катодного узла, вакуумная часть тракта СВЧ и симметрично устроенный отвод запредельного волновода для подключения вакуумного насоса. К камере катодного узла проложены дополнительные каналы откачки, окружающие канал пучка, находящийся на оси системы. Для определения параметров вакуумного оборудования выполнено моделирование с помощью программы Molflow+, использующей метод Монте-Карло для расчета молекулярных потоков в высоковакуумных структурах [2]. Получены профили распределения давления вдоль траектории пучка. В результате уровень давления на оси пучка установился в диапазоне $1-1,5 \cdot 10^{-5}$ Па, что соответствует рабочему диапазону давлений. Для снижения уровня остаточного давления, с целью получения требуемого запаса по остаточному вакууму по сравнению с рабочим в условиях повышенных газовых нагрузок, должно проводиться предварительное обезгаживание на вакуумном посту до более высокого вакуума и последовательное выполнение процедур тренировки вакуумной системы в рабочих условиях. Также возможно рассмотрение варианта подключения отдельного магниторазрядного насоса непосредственно к камере катодного узла, что позволит не только снизить уровень предельного статического давления, но и ускорит откачку динамических газовых потоков от работающего термокатода.

Список литературы

1. M.V. Lalayan, A. Batov, M. Gusarova et al., Compact S-Band Accelerating Structure for Medical Application, in Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'21), Alushta, Russia, 2021, pp. 186-188. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA42.
2. Molflow+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/<https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ УСЛОВИЙ В КОЛЬЦЕ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Изучено влияние изменений параметров пучка и магнитной структуры на вакуумные условия в камерах источника. Построена модель камеры накопительного кольца и выполнен расчет характеристик потока излучения, создаваемого пучком заряженных частиц при прохождении этого участка, используя метод Монте-Карло с помощью программы Synrad+.

V.S. DYUBKOV, A.S. PANISHEV, S.M. POLOZOV, V.L. SHATOKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SIMULATION OF VACUUM CONDITIONS IN THE SYNCHROTRON RADIATION SOURCE RING

The influence of changes in the beam parameters and magnetic structure on the vacuum conditions in the source chambers is studied. A model of the storage ring chamber is constructed, and the characteristics of the radiation flux generated by a charged particles beam during the passage of this section are calculated using the Monte Carlo method with the Synrad+.

Во время работы источника синхротронного излучения (СИ) генерируется интенсивный поток фотонного излучения внутри вакуумных камер накопительного кольца. С целью уменьшения негативных эффектов от падающего излучения в местах с большой радиационной нагрузкой устанавливаются специальные поглотители – абсорберы, с помощью которых отводится основная часть тепловой нагрузки и снижается уровень газовой нагрузки.

Проведенные оценки [1] выявили главенствующую роль в формировании вакуумных условий стимулированной десорбции с поверхностей поглотителей по сравнению с газовыделением внутренних поверхностей вакуумных камер, не испытывающих воздействия излучения. С изменением параметров магнитной системы и геометрии кольца накопителя изменяются и характеристики потока излучения на отдельных участках вакуумных камер. Под эти изменения должны рассчитываться конфигурация поглотителей и вакуумной системы.

Расчет параметров СИ и фотостимулированной десорбции может быть выполнен с помощью Synrad+ [2]. Методом Монте-Карло программа вычисляет параметры СИ (поток излучения, мощность, спектр), падающего на стенки камер. Использование в одном пакете с Molflow+ [3] позволяет перевести полученное распределение СИ в газовый поток десорбции с внутренней поверхности, можно смоделировать вакуумные условия внутри накопителя.

Для проектируемого источника СИ в НИЦ «Курчатовский институт» была скорректирована магнитная система. Для отслеживания влияния изменений параметров оптической системы на уровень вакуума был выполнен расчет СИ для одного периода. В результате моделирования получены характеристики потоков СИ по внутренним поверхностям камер. Отдельными магнитами создавались потоки СИ от 250 до 2200 Вт, суммарная мощность составила 9752 Вт, максимальная плотность энергии достигала 5128 Вт/см^2 . Сравнивая результаты с предыдущими расчетами [1] (рис. 1), можно отметить уменьшение мощности СИ для магнита DL1 с 4198 Вт до 1066 Вт из-за увеличения радиуса поворота пучка электронов вследствие уменьшения магнитного поля. Аналогичное снижение можно ожидать и в других дипольных магнитах. В совокупности это должно положительно сказаться на вакуумных условиях, уменьшая СИ-стимулированную десорбцию.

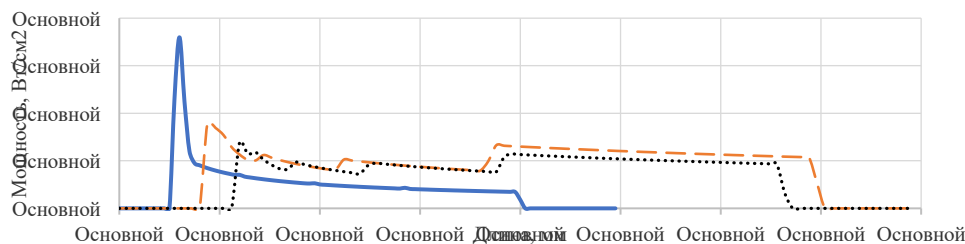


Рис. 1. Распределение мощности поглощенного СИ магнитом DL1 для разных конфигураций оптической системы.

Список литературы

1. S.M. Polozov, V.S. Dyubkov, A.S. Panishev, V.L. Shatokhin, Vacuum condition simulations for vacuum chambers of synchrotron radiation source, in Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'21), Alushta, Russia, 2021, pp. 355-357. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021- WEPSC 08.
2. Synrad+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/<https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>.
3. M. Ady, R. Kersevan. Recent developments of Monte-Carlo codes Molflow+ and SynRad+. 10th Int. Particle Accelerator Conf., Melbourne, Australia - doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP037.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СФОКУСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В УЗКИХ ПРОТЯЖЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБКАХ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

Представлены результаты исследования геометрических размеров сфокусированного электронного пучка по мере его распространения в форвакуумной области давлений. Исследовано влияние на распределение тока электронного пучка при его прохождении в узкой протяженной металлической трубке в зависимости от размеров трубки и параметров пучка.

I.YU. BAKEEV, A.A. ZENIN, A.S. KLIMOV

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

SOME ASPECTS OF PROPOGATION OF A FOCUSED ELECTRON BEAM IN NARROW EXTENDED METAL TUBES IN THE FOREVACUUM PRESSURE RANGE

The results of a study of the geometric dimensions of a focused electron beam as it propagates in the fore-vacuum pressure region are presented. The effect on the distribution of the current of an electron beam as it passes through a narrow extended metal tube is studied as a function of the tube dimensions and beam parameters.

Ионно-плазменная обработка внутренних поверхностей узких протяженных полостей с поперечным размером в несколько миллиметров требует совместного решения задач проникновения плазмы в полость и обеспечения ее равномерности по всей длине полости. Решению проблемы ионно-плазменной обработки внутренней поверхности трубчатых изделий посвящено множество работ [1-3]. Одним из способов облегчения генерации плазмы в узких протяженных полостях является инжекция электронов в полость для инициирования несамостоятельного тлеющего разряда [3]. Однако использование сфокусированного электронного пучка, генерируемого при повышенных давлениях рабочего газа [4], в качестве источника ионизации внутри трубки даст большие возможности для управления процессами инициирования и горения несамостоятельного разряда в полости узких протяженных трубок.

Отличительным научным результатом, полученным при исследовании диаметра поперечного сечения сфокусированного электронного пучка по мере его распространения при повышенных давлениях, стал тот факт, что характер распространения электронного пучка меняется при прохождении пучком плоскости кроссовера. Так, образуемые пучком углы сходимости α и расходимости β пучка после преодоления кроссовера имеют различные значения. Зависимости отношения угла расходимости β к углу сходимости α сфокусированного электронного пучка представлены на рис. 1а, свидетельствующие об уменьшении данного отношения при отдалении плоскости кроссовера.

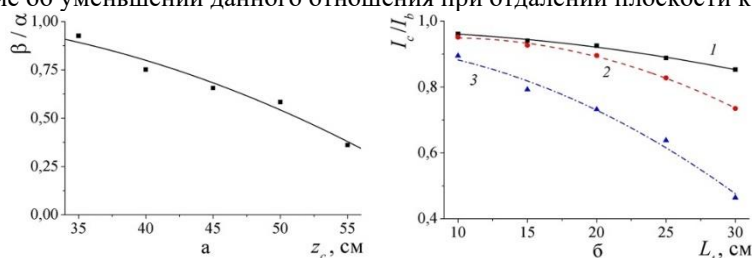


Рис. 1. Зависимость отношения угла расходимости к углу сходимости β/α сфокусированного электронного пучка от положения кроссовера z_c (а) и зависимости коэффициента токопрохождения электронного пучка I_c/I_b от протяженности трубки L_t (б) при различных диаметрах трубки D_t (1 – $D_t = 9,2$ мм; 2 – $D_t = 7,5$ мм; 3 – $D_t = 5,8$ мм)

Результаты, демонстрирующие зависимости коэффициента токопрохождения сфокусированного электронного пучка через металлическую трубку (отношение тока пучка, прошедшего через трубку, к общему току пучка) в зависимости от длины трубки при различных диаметрах трубки, представлены на рис. 1б. Из рис. 1б видно, что коэффициент токопрохождения уменьшается при увеличении протяженности трубки, степень данного уменьшения растет при уменьшении диаметра трубки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-79-10217.

Список литературы

1. Kwon S.C., Park M.J., Baek W.S., Lee G.H. // Journal of Materials Engineering and Performance. 1992. V. 1. № 3. P. 353.
2. Borisyuk Y.V., Mozgrin D.V., Oreshnikova N.M., Berdnikova M.M., Pisarev A.A. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. V. 12. № 3. P. 603.
3. Ignatov D.Y., Lopatin I.V., Denisov V.V., Koval N.N., Ahmadeev Y.H. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. V. 48. № 6. P. 2050.
4. Bakeev I.Y., Klimov A.S., Oks E.M., Zenin A.A. // Plasma Sources Science and Technology. 2018. V. 27. № 7. P. 075002.

А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ

Продолжены работы по проектированию вакуумной системы линейного ускорителя ионов. Уточнены и детализированы расчетные модели резонаторов и RFQ. Предложена новая система откачки с использованием магниторазрядных насосов. Определена эффективная производительность предварительной откачки. Рассчитаны профили давления вдоль траектории движения заряженных частиц.

A.S. PANISHEV, S.M. POLOZOV, V.L. SHATOKHIN

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

VACUUM SYSTEM OF LINEAR ION ACCELERATOR

Work on the design of the vacuum system of the linear ion accelerator was continued. The computational models of resonators and RFQ are modified and detailed. A new pumping system using magnetic discharge pumps is proposed. The efficiency of the pre-pumping system is determined. Pressure profiles along the trajectory of charged particles are calculated.

Для вакуумной системы линейного ускорителя ионов [1] скорректирована схема высоковакуумной откачки и поддержания требуемого уровня высокого вакуума в рабочем режиме. Для откачки объемов RFQ и резонаторов ИИ типа вместо откачки при совместной работе турбомолекулярных (ТМН) и магниторазрядных (МРН) насосов предложено использовать в качестве основных высоковакуумных насосов МРН. Несмотря на преимущества, автономное использование МРН осложняет тот факт, что они очень чувствительны к стартовому давлению. При давлении свыше 10^{-3} Па МРН не могут работать продолжительное время, что приводит к значительному сокращению их срока службы и нарушению устойчивого режима работы. Кроме того, МРН обладают высокой селективностью откачки по разным газовым нагрузкам, особенно в отношении инертных газов. Поэтому необходимость применения дополнительных ТМН насосов частично сохраняется. В основном ТМН необходимо использовать для предварительной высоковакуумной откачки, затем возможно их отключать после запуска основных МРН насосов. При этом в условиях присутствия повышенных газовых нагрузок при работе с пучком, вызванных стимулированной десорбцией на начальных этапах запуска системы, или связанных с вероятностью появления рассеянных потоков нейтрализованных ускоренных частиц, предусматривается возможность организации вспомогательной откачки с помощью ТМН. В целях частичной компенсации повышенной селективности МРН могут быть использованы насосы комбинированного (дифференциального) типа, имеющие улучшенные характеристики по откачке инертных газов.

Для RFQ предварительная откачка может обеспечиваться двумя ТМН насосами производительностью 300 л/с, установленными по краям RFQ непосредственно на корпусе и подключенными к нему через порты ДУ160 с решетками на выходе. Общая эффективная скорость откачки с учетом проводимости портов составила 462 л/с и обеспечивает давление вдоль траектории пучка не более $4,4 \times 10^{-5}$ Па. Это можно считать достаточным уровнем вакуума для запуска МРН, однако, с учетом таких факторов, как вероятность избыточной газовой нагрузки со стороны ионного источника, а также создание определенного запаса по глубине вакуума для устойчивого пускового режима насосов, возможно использование ТМН на 700 л/с. В дальнейшем, после достижения требуемого уровня вакуума, откачка производится 12-ю МРН по 320 л/с каждый, подключенные через порты ДУ160.

Откачка группы Н-резонаторов до давления запуска МРН может осуществляться с помощью ТМН производительностью 300 л/с через коллектор – общий трубопровод диаметром 100 мм, подключенный к каждому резонатору через отдельный порт. Для шести резонаторов ИИ1 используется два ТМН, для восьми ИИ2 – три насоса. Расчет давления вдоль траектории пучка с помощью программы Molflow+, использующей метод Монте-Карло для моделирования молекулярных потоков в высоковакуумных структурах [2], показал, что выбранная система коллекторной откачки позволяет получить необходимый уровень вакуума для запуска МРН. Уровень давления на оси пучка установился в диапазоне $1-2,4 \cdot 10^{-4}$ Па. После предварительной откачки запускаются МРН насосы производительностью 320 л/с по два на каждый резонатор. Кроме этого, исследована возможность использования ТМН, подключенных к коллектору, в качестве основных насосов совместно с МРН при повышенных стимулированных газовых нагрузках. Для этого рассчитывалась эффективность откачки на каждый резонатор. В зависимости от расположения резонатора в группе, эффективная скорость откачки непосредственно объема резонатора составила от 30 до 60 л/с.

Рассмотрены и рассчитаны вакуумные системы для реализации различных этапов высоковакуумной откачки резонаторных структур ускорителя. В качестве основных высоковакуумных средств рассматриваются МРН, ТМН для предварительной откачки, позволит повысить ресурс и надежность вакуумной системы ускорителя, упростит эксплуатацию и обслуживание, продлит время безостановочной работы установки.

Список литературы

1. S.M. Polozov, A.S. Panishev, V.L. Shatokhin, Optimization of accelerators vacuum structures pumping, in Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'21), Alushta, Russia, 2021, pp. 361-363. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021- WEPSC10.
2. Molflow+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/<https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>.

А.А. МОЛИН, С.М. ПОЛОЗОВ, А.В. ПРОКОПЕНКО
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЦЕНТР НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработан проект создания в НИЯУ МИФИ лабораторий новых технологий применения пучков заряженных частиц и потоков излучения на базе промышленного линейного ускорителя электронов, радиобиологического и материаловедческого аналитических комплексов. Определены основные перспективные направления исследований радиационных воздействий связанные с медикобиологическим направлением и направлением продовольственной безопасности. Подготовлены эскизные проекты создания ускорительной, медикобиологической, биохимической, микробиологической и технологической лабораторий.

A.A. MOLIN, S.M. POLOZOV, A.V. PROKOPENKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CENTER FOR NEW TECHNOLOGIES FOR THE APPLICATION OF CHARGED PARTICLE BEAMS AND RADIATION FLUXES

The project of new laboratory at NRNU MEPhI for new technologies for the use of charged particle beams and radiation fluxes based on an industrial linear electron accelerator, radiobiological and material science studying equipment has been developed. The main promising areas of radiation exposure research related to the medical and biological direction and the direction of food security are identified. Preliminary designs for the laboratories of accelerator, biomedical, biochemical, microbiological and technological have been prepared.

В последние десятилетие в России наметился подъём интереса к использованию радиационных технологий в различных областях индустриальной и хозяйственной деятельности. Модернизируются и строятся новые радиационно-ускорительные центры для облучения медицинской продукции с целью стерилизации и продуктов питания для фитосанитарного контроля и повышения сроков хранения пищевой продукции. С целью повышения уровня продовольственной безопасности с 2015 года на уровне правительства принимаются и вводятся в действие межгосударственные стандарты по радиационной обработке различных пищевых продуктов. Также появляются новые технологии использования электронных пучков в медицине, биотехнологиях, органической химии, радиационно-активационном анализе и в пищевых системах. Для изучения, совершенствования и внедрения новых радиационных технологий, а также подготовки кадров в НИЯУ МИФИ разрабатывается проект по созданию центра новых технологий применения пучков заряженных частиц и потоков излучений. Проект центра планируется реализовать в НИЯУ МИФИ в рамках проекта развития высшего образования «Приоритет 2030».

Основной установкой новой лаборатории будет современный промышленный резонансный импульсный ускоритель электронов. Такие ускорители разрабатываются кафедрой Электрофизических установок НИЯУ МИФИ и НПП «Корад» (г. Санкт-Петербург) и имеют возможность перестройки пучка по энергиям от 3,5 МэВ до 10 МэВ с узким спектральным распределением. Предполагается возможность конвертации энергии электронного пучка на мишени в гамма излучение требуемой энергии и интенсивности. Ускорительный комплекс и сопутствующие лаборатории планируется разместить на территории московской площадки НИЯУ МИФИ. Данный ускоритель планируется использовать для изучения возможности создания новых органических и неорганических материалов, исследования в области медицины, фармакологии, экологии и продовольственной безопасности. Подготовлен перечень исследований в новых областях радиационных технологий и проведены переговоры с организациями, заинтересованными в работе на электронном ускорителе. На ускорительном комплексе будут отрабатываться современные методики дозиметрии с использованием ЭПР спектрометрии с целью создания новых методик валидации результатов облучения медицинской и пищевой продукции при дозах до 10 кГр на существующих радиационных комплексах.

Подготовлены проекты создания лабораторно-исследовательской базы обслуживающей проводимые исследования по радиационному облучению, а именно медикобиологической лаборатории, биохимической лаборатории, научно-исследовательской микробиологической лаборатории для работы с микроорганизмами III и IV группы и технологической лабораторий пищевых систем. Данная лабораторная база дает возможность решать основные задачи по разработке новых технологий применения пучков заряженных частиц и потоков излучений.

Таким образом, подготовлен комплексный проект создания центра новых технологий применения пучков заряженных частиц и потоков излучений, который может быть реализован на московской площадке НИЯУ МИФИ к концу 2024 г в рамках реализации программы «Приоритет 2030».

Е.Д. КАЗАКОВ^{1,2}, О.С. КОСАРЕВ², Д.Д. МАСЛЕННИКОВ¹, И.А. ТАРАКАНОВ²

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²ИИМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

На сильноточном электронном ускорителе РС-20 предложена и опробована схема генерации токов в замкнутом объеме за счет мощных потоков тормозного рентгеновского излучения генерируемого при взаимодействии пучка электронов с твердотельной мишенью. Проведено сравнение результатов эксперимента с данными математического моделирования.

E.D. KAZAKOV^{1,2}, O.S. KOSAREV², D.D. MASLENNIKOV¹, I.A. TARAKANOV²

¹NRC "Kurchatov institute", Moscow, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CURRENT GENERATION IN A CLOSED VOLUME UNDER THE INFLUENCE OF X-RAY BREMSSTRAHLUNG RADIATION.

A scheme for generating currents in a closed volume due to high-power X-ray bremsstrahlung fluxes generated by the interaction of an electron beam with a solid target is proposed and tested on the RS-20 high-current electron accelerator. The results of the experiment are compared with the data of mathematical modeling.

Взаимодействие электронов радиационных поясов Земли [1] с корпусами космических аппаратов может приводить к возникновению тормозного излучения, длина пробега которого в веществе обшивки аппарата существенно превышает длину пробега электронов. Эти электроны, движущиеся внутри корпуса, создают электромагнитные поля, которые приводят к возникновению помех в кабелях электропроводки, а в некоторых случаях и к выходу из строя микроэлектроники управляющих или функциональных блоков. Полномасштабное физическое моделирование таких процессов – чрезвычайно дорогостоящая задача. Однако оценить некоторые параметры и отследить ряд закономерностей можно, проведя экспериментальное исследование генерации токов в замкнутом объеме под действием потоков тормозного рентгеновского излучения. Полученные данные могут быть использованы для построения и верификации математических моделей, которые позволят предсказывать результат взаимодействия космических аппаратов с электронами радиационных поясов Земли в условиях, наиболее приближенных к реальным.

В данной работе предложена схема регистрации токов в цилиндрическом замкнутом объеме под действием мощного потока рентгеновского излучения сильноточного электронного ускорителя РС-20 [2]. Цилиндрический объем из оргстекла располагался непосредственно под анодом электронного ускорителя, обеспечивавшего импульс тока длительностью порядка 300 нс и амплитудой до 100 кА при напряжении на диоде до 1,5 МэВ. Торцы цилиндра герметично закрыты электродами, к которым через нагрузку подключен осциллограф. Проведены серии экспериментов, в которых объем был заполнен воздухом при атмосферном давлении, либо за счет специально сделанных отверстий обеспечивался вакуум, соответствующий уровню давления в экспериментальной камере ускорителя (давление не выше $5 \cdot 10^{-5}$ торр). В отдельных экспериментах на электроды объема подавалось напряжение до 500 В, обеспечивающее тормозящее, либо разгоняющее электрическое поле. В отсутствии приложенного напряжения ток через объем составлял порядка 0,2-0,3 А. В то же время при наличии разгоняющего поля амплитуда тока могла превышать 2 А.

Результаты экспериментов сравнивались с расчетами по модели генерации электромагнитного поля проникающим излучением [3], разработанной в ИИМ им. М.В. Келдыша РАН.

Результаты численного моделирования хорошо соответствуют экспериментальным данным. Последующие эксперименты будут призваны верифицировать математическую модель генерации электромагнитного поля ионизирующим излучением при давлениях в замкнутом объеме от атмосферного до 0,1 торр.

Эксперименты на установке РС-20 проводились при поддержке НИИЦ «Курчатовский институт» (Приказ № 2948 от 18.11.2021).

Список литературы

1. N. Vernov, A.E. Chudakov // Space Research. H. Kallmann Bijl (eds). - Amsterdam: 1960, p.751–796.
2. Г.И. Долгачев, Е.Д. Казаков, Ю.Г. Калинин и др. // Физика плазмы, 2019, том 45, № 4, с. 303–312
3. A.V. Berezin, A. S. Vorontsov, M. E. Zhukovskiy et al // Comput. Math. Math. Phys., 55:9 (2015), 1534–154

ПРИМЕНЕНИЕ ФИТИРОВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МЕТОДОМ ПОГЛОЩАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Разработана модификация метода поглощающих фильтров измерения спектров электронных пучков, основанная на фитировании статистическими распределениями исходных данных и матрицы уравнения, описывающего прохождение пучка через фильтры. Новый метод позволяет повысить точность и качество обработки экспериментальных данных.

A.A. DROZDOVSKY, S.A. DROZDOVSKY, A.V. KANTSYREV, A.V. SKOBLIAKOV, V.A. VOLKOV
 National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

METHOD OF FITTING FOR DETERMINATION OF THE SPECTRUM OF AN ELECTRON BEAM BY MEANS OF ABSORPTION FILTERS

We developed a modification of the absorption filters method to determine the spectrum of an electron beam, based on fitting the input data and the matrix of the absorption equation by statistical distributions. The new method is more accurate and stable, and consistent with the direct measurements by a magnetic spectrometer.

Интерес к измерению спектра энергий электронных пучков методом поглощающих фильтров обусловлен технической доступностью по сравнению с магнитной спектрометрией. Пучок пропускается через последовательность металлических пластин одинаковой толщины, расположенных перпендикулярно оси пучка с фиксированным интервалом, при этом измеряется поглощенный в каждой пластине заряд. Полученных таким образом экспериментальных данных достаточно для реконструкции всего энергетического спектра пучка.

Процессу прохождения пучка через пластины соответствует система интегральных уравнений

$$\int_{E_{min}}^{E_{max}} K_i(\varepsilon) q(\varepsilon) d\varepsilon = Q_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где Q_i – экспериментально определенный заряд, поглощенный пластиной под номером i , $q(\varepsilon)$ – энергетический спектр пучка, ε – энергия, $q = dQ/d\varepsilon$, $K_i(\varepsilon)$ – ядро интегрального преобразования. После дискретизации по энергии (индекс j) соотношения принимают вид системы линейных уравнений:

$$\sum_j K_{ij} q_j = Q_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m,$$

или в матричной форме: $Kq = Q$.

Матрица K получается моделированием прохождения электронных пучков с использованием программы Geant 4 [1]. Рассчитывались величины накопления зарядов на фольгах при пропускании моноэнергетических пучков в диапазоне от 10 до 300 кэВ с шагом 10 кэВ.

Система интегральных уравнений с таким ядром является некорректно поставленной обратной задачей [2], которая решается методом регуляризации Тихонова, т.е. минимизацией по q функционала

$$\|Kq - Q\|^2 + \alpha \|q\|^2, \quad \alpha > 0,$$

где $\| \cdot \|$ – обозначает норму.

Если использовать оригинальные массивы K и Q , то, в силу высокой степени некорректности задачи, значения параметра регуляризации α будут большими, что приводит к искажениям и неточности. Фитирование привело к уменьшению α практически до нуля (метод наименьших квадратов), что позволило достичь приемлемым точности и качества обработки. Фитирование матрицы K_{ij} проводится послойно: сначала для каждого фиксированного j приближается соответствующий одномерный массив, индексруемый i , функцией $\alpha_j P_N(\sigma_j, \mu_j; x) + \beta_j$ переменного x , затем аналогично для каждого i – функцией $\alpha_i P_{LN}(\sigma_i, \mu_i; y - \lambda_i)$ переменного y , где P_N и P_{LN} – функции плотности вероятности нормального и логнормального распределений. Данные эксперимента фитируются функцией $\alpha P_N(\sigma, -\mu; -x)$. Спектр, полученный методом фитирования удовлетворительно согласуется с магнитной спектрометрией [3], что иллюстрирует рис. 1.

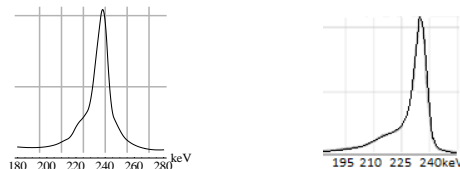


Рис. 1. Спектр электронного пучка: слева – полученный методом фитирования, справа – измеренный на магнитном спектрометре.

Список литературы

1. GEANT4 Collaboration. <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/index.html> (2021).
2. Vogel Curtis R. Computational Methods for Inverse Problems. Frontiers in Applied Mathematics, v.23. – SIAM, 2002.
3. A.A. Drozdovsky *et al.*, “Electronic gun for physical researches,” *Phys. Part. Nucl. Lett.* 11, 577–580, 2014.

В.А. ПОНОМАРЕВ, Е.С. ПЕРМЯКОВА, А.Н. ШЕВЕЙКО, Д.В. ШТАНСКИЙ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский проспект 4, 119049, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТИ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Покрyтия TiCaCON-Si были подвергнуты бомбардировке потоком высокоэнергичных ионов металлов Pt и Fe с целью насыщения ими поверхностного слоя. Обработка ионами привела к изменению структуры и состава приповерхностного слоя и образованию наночастиц Pt и Fe на поверхности. Было изучено влияние имплантации на Дзета-потенциал поверхности, фотокаталитические свойства материала и способность покрытий поглощать электромагнитное излучение. Исследована активность поверхности против бактерий после активации рентгеновским излучением, а также цитосовместимость материала.

V.A. PONOMAREV, E.S. PERMYAKOVA, A.N. SHEVEYKO, D.V. SHTANSKY

National University of Science and Technology MISIS, Leninsky prospect 4, 119049, Moscow, Russia

USE OF AN ION ACCELERATOR FOR PROVIDING NANOPARTICLES ON A SURFACE AND THE ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF A MATERIAL

TiCaCON-Si coatings were bombed by a high-energy metal Pt and Fe ions beam to saturate the surface layer with these elements. Ion processing led to a change in the structure and composition of the subsurface layer and the formation of Pt and Fe nanoparticles on the surface. The effects of implantation on Zeta potential, photocatalytic properties of the material and the ability of coatings to absorb electromagnetic radiation were studied. The activity of the surface against pathogenic bacteria after activation with X-ray radiation as well as the biocompatibility of the material were investigated.

Антибактериальная инфекция является распространенной причиной выхода имплантатов из строя. Генерация активных форм кислорода (АФК) в зоне имплантации является одним из способов противодействия бактериальной инфекции. Активировать генерацию АФК можно с помощью воздействия электромагнитного излучения на материал с фотокаталитической активностью, однако, как правило, в ультрафиолетовом диапазоне. В работе стояла задача обеспечить восприимчивость покрытия TiCaCON-Si к активации ультрафиолетовым и рентгеновским излучением через легирование Si и формирования наночастиц (НЧ) на поверхности методом имплантации высокоэнергичных ионов Pt и Fe.

Покрyтие было получено методом магнетронного распыления композиционной СВС мишени состава $TiC_{0,5}+Si_3N_4+CaO_2$. На следующем этапе была проведена обработка покрытий в потоке ионов Pt или Fe с помощью ускорителя ионов типа МЕТА. Обработку проводили при напряжении 30 кВт, токе 5–7 мА в разряженной атмосфере Ar ($2,3 \cdot 10^{-2}$) в течение 40 мин. Образцы располагались на расстоянии 100 мм от сетки супрессора имплантера ионов.

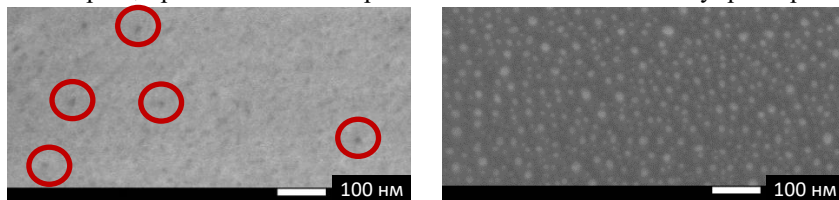


Рис.1. РЭМ изображение поверхности покрытий TiCaCON-Si после имплантации ионов (а) Fe и (б) Pt

Множество равномерно распределённых наночастиц (НЧ) Pt и редких НЧ Fe размером 10–20 нм были обнаружены на поверхности покрытий методом РЭМ. Ионная имплантация привела к изменению состава и аморфизации структуры приповерхностного слоя толщиной 50 нм, что показано методом ПЭМ. Анализ поверхности методом РФЭС показал, что Pt присутствует в виде фаз Pt, PtO, PtO₂ и PtTi, а Fe в виде Fe₂O₃. Наночастицы на поверхности изменили характер поглощения света покрытиями TiCaCON-Si, сместив пики поглощения в сторону меньших и больших волновых чисел для Fe и Pt, соответственно. Дзета-потенциал покрытий находится в диапазоне от -40 до -60 мВ при изменении pH от 3 до 10, а наличие НЧ Fe ускоряет изменение Дзета-потенциала. Показано, что покрытия TiCaCON-Si с НЧ Fe способны генерировать АФК после воздействия УФ в количестве не менее 600–800 нмоль/см², а после воздействия рентгеновского излучения (10 сек) не менее 4000 нмоль/см² через 8 часов выдержки. Было показано, что такие концентрации АФК обеспечивают 100% антибактериальную активность покрытий против *Escherichia coli U20* уже через 8 часов выдержки.

Работа выполнена при поддержке РФФ в рамках соглашения № 20-19-00120

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК (УТ) ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРОБНЫМИ ДЕЙТЕРИЕВЫМИ МИШЕНЯМИ НА РАЗБОРНОМ ВАКУУМНОМ СТЕНДЕ

Предложен метод восстановления нейтронного поля, создаваемого вакуумной УТ с метало- тритиевой мишенью сложной конфигурации. Он использует данные нейтронных измерений на разборном вакуумном стенде с дейтериевой мишенью малого размера. Метод обеспечивает радиационную безопасность работ. Приводятся конкретные примеры его применения в процессе исследования ионных диодов, разрабатываемых в НИЯУ МИФИ.

A.A. ISAEV, K.I. KOZLOWSKII, A.E. SHIKANOV, O.V. YAKOVLEV

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

PREDICTION OF THE NEUTRON YIELD IN ACCELERATOR TUBES FROM THE DATA OF MEASUREMENTS WITH TEST DEUTERIUM TARGETS ON DISASSEMBLING VACUUM BENCH

A method is proposed for restoring the neutron field created by a vacuum accelerating tube with a metal-tritium target of complex configuration. The method uses data from neutron measurements on a disassembling vacuum bench with a small deuterium target. The method ensures radiation safety of work. Specific examples of its application in the process of studying ion diodes developed at the National Research Nuclear University MEPhI are given.

Прямое измерение нейтронных характеристик разрабатываемых УТ требует обеспечение условий радиационной безопасности. Это, при отсутствии помещений со средствами биологической защиты, создает трудности для исследователей и разработчиков.

Для обеспечения необходимых требований радиационной безопасности генерацию нейтронов предложено осуществлять в импульсном режиме в пробных дейтериевых нейтронообразующих мишенях малого размера (площадь $\Delta S \sim 1 \text{ см}^2$) на реакции $D(d, n)^3\text{He}$, имеющей примерно на два порядка, меньшее микросечение по сравнению с реакцией $T(d, n)^4\text{He}$, используемой в разрабатываемых УТ. Далее проводить компьютерный пересчет данных нейтронных измерений на предполагаемый поток УТ, излучаемый с реальной тритиевой мишенью в номинальном импульсно-периодическом режиме работы.

Пробная мишень из дейтерированного вещества располагалась на катоде разборной модели УТ в точке с радиус-вектором \mathbf{r} . Число бомбардирующих ее дейтронов, определяется следующей формулой:

$$\Delta N_d(\mathbf{r}) \approx \Delta N_n(\mathbf{r}) \left[N_A \frac{\chi_n \rho_n \Delta S}{A_n} \int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,d)}(T_d)}{F_n(T_d)} \right]^{-1},$$

где ΔN_n – измеренное за импульс число нейтронов, излучаемых пробной мишенью, N_A – число Авогадро, ρ_n , A_n – плотность и атомная масса вещества удерживающего дейтерий в пробной мишени, χ_n – среднее число атомов дейтерия, приходящихся на атом сопутствующего вещества (коэффициент стехиометрии пробной мишени), $U(t)$ – зависимость ускоряющего напряжения от времени, $\sigma_{(d,d)}(T_d)$, $F_n(T_d)$ – зависимости микросечения реакции $D(d, n)^3\text{He}$ и потерь энергии дейтроном в пробной мишени на единицу длины от энергии.

С использованием этой формулы было получено выражение, прогнозирующее нейтронный поток УТ в полный телесный угол:

$$\Phi \approx f \frac{\chi_M \rho_M A_M}{\chi_n \rho_n A_n \Delta S} \int_{S_M} dS \Delta N_n(\mathbf{r}) \int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,d)}(T_d)}{F_M(T_d)} \left[\int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,d)}(T_d)}{F_n(T_d)} \right]^{-1}$$

где ρ_M , A_M – плотность и атомная масса металла удерживающего тритий в мишени УТ, χ_M – коэффициент стехиометрии мишени УТ по тритию, S_M – поверхность мишени УТ, f – предполагаемая частота срабатываний УТ.

По данной методике осуществлялась успешная интерпретация результатов экспериментов, проводимых в НИЯУ МИФИ с ионными диодами [1-3] и предполагается ее реализация в дальнейшем при разработке и создании УТ нового поколения для генерации нейтронов [4]. Приводятся конкретные примеры реализации методики.

Список литературы

1. Didenko A.N., Shikanov A.E., Kozlovskii K.I., Shatokhin V.L., Ponomarev D.D. Plasma Physics Reports, 2014, 40(11), pp. 910-918.
2. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I. Atomic Energy, 2016, 119(4), pp. 258-264.
3. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I., Shatokhin V.L. Technical Physics Letters, 2015, 41(5), pp 511-513.
4. Anan'in O.B., Tsybin A.S., Shikanov A.E., Kozlovsky K.I. Atomic Energy, 2013, 115(2), pp. 137-141.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МОБИЛЬНОГО БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В данной статье рассмотрен вариант создания ускорительного комплекса мобильного базирования для обнаружения взрывчатых веществ. Описаны характеристики данной установки.

B. Yu. BOGDANOVICH, G. O. BUYANOV, A. V. NESTEROVICH
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MOBILE-BASED ACCELERATOR COMPLEX FOR DETECTION OF EXPLOSIVES

This article considers a variant of creating a mobile-based accelerator complex for detecting explosives. The characteristics of this installation are described.

В Радиационно-ускорительном центре НИЯУ МИФИ совместно с ООО «Нано Инвест» спроектирован, изготовлен и запущен ускорительный комплекс мобильного базирования (УКМБ) на основе линейного ускорителя (ЛУЭ). Комплекс снабжен выходным устройством в виде поворотного магнита, обеспечивающего дистанционное управление направлением пучка электронов (или тормозного излучения из конверсионной мишени). Он может быть основной частью системы разминирования, в первую очередь, безоболочечных взрывных устройств (мины).

Как показали предварительные исследования [1, 2, 3], для эффективной регистрации ВВ данным методом необходима энергия электронов не менее (40 – 60) МэВ, Схема комплекса показана на рис. 1 [2].

В нашем случае ускоряющая система УКМБ выполнена на основе бипериодической системы и состоит из 4-х ускоряющих секций [4]. Первая секция включает две группирующие ячейки и 10 ускоряющих ячеек каждая из 3-х других секций включает 12 ускоряющих ячеек.

Трехэлектродный инжектор электронов с сеточным управлением присоединен к первой ускоряющей секции. Вся вакуумная система работает при давлении меньше 10^{-7} бар.

Система СВЧ-питания включает 2 клистрона, 2 направленных ответвителя, 2 волноводных моста, 2 волноводных нагрузки и волноводный коаксиальный ответвитель.

Локальная защита включает набор свинцовых блоков специальной формы.

В ходе испытаний получены следующие параметры пучка электронов: $W_{\max} = 40$ МэВ; $I_{\text{имп}} = 100$ мА.

Измерения проводились с помощью многопластинчатого цилиндра Фарадея.

На рис. 2 показана основная часть УКМБ.

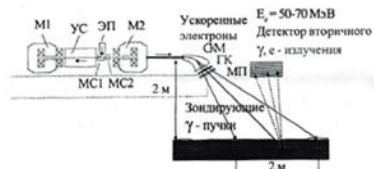


Рис. 1. Общая схема ускорительно-детектирующей системы обнаружения скрытых ВВ. Основные элементы ускорителя: M1, M2 – поворотные магниты; УС – ускоряющая структура; ЭП – электронная пушка; MC1, MC2 – магниты инжектора; СКМ – магнит сканирования; ГК – гамма конвертора; МП – монитор пучка.

Рис. 2. Основная часть УКМБ:

1, 2 – ускоряющие секции; 3 – волноводный мост (ЗдБ напр. отв.); 4 – общий вакуумный коллектор ускоряющей системы; 5 – несущая рама ускорителя

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. А.С. Белоусов, А.И. Карев, Е.И. Малиновский и другие. Высокоэффективная система обнаружения скрытых взрывчатых веществ. Наука – производству. 2000. № 6 (31). С. 33 – 41.
3. Богданович Б.Ю., Буянов Г.О., Нестерович А.В. Повышение эффективности систем дистанционного радиационного контроля на базе линейного ускорителя электронов. Журнал технической физики Год 2021, выпуск 7, стр. 1174.
4. А.А. Завадцев, Д.А. Завадцев и другие. Расчет и настройка линейного ускорителя электронов на энергию 40 МэВ. Приборы и техника эксперимента, 2013, № 5, с. 14–23.

К.В. САФРОНОВ, В.А. ФЛЕГЕНТОВ, Н.Н. ШАМАЕВА, А.С. ТИЩЕНКО, Д.О. ЗАМУРАЕВ,
А.Л. ШАМРАЕВ, С.Ф. КОВАЛЕВА, Н.А. ФЕДОРОВ, С.М. ДУБРОВСКИХ, А.С. ПИЛИПЕНКО,
А.С. КУСТОВ, Е.А. ШИБАКОВ, О.Н. ГИЛЁВ

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ), Снежинск, Россия

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В МИКРОЭЛЕКТРОННОМ УСТРОЙСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОТОНОВ ЛАЗЕРНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Одной из основных причин выхода из строя космических аппаратов является воздействие одиночных высокоэнергетических заряженных частиц, вызывающих сбои в микроэлектронных устройствах бортовой аппаратуры. В связи с непрекращающимся уменьшением топологических норм современных микросхем наблюдается тенденция к усугублению проблемы одиночных сбоев. В настоящее время тестирование микроэлектронных устройств перед применением в бортовой аппаратуре проводится с использованием громоздких радиочастотных ускорителей. Применение компактных лазер-плазменных ускорителей заряженных частиц позволит значительно сократить время и стоимость испытаний.

На 200 ТВт фемтосекундной лазерной установке проведены эксперименты по облучению микроконтроллера, изготовленного по топологической норме 180 нм, пучками лазерноускоренных протонов. Частицы с энергиями до 6 МэВ генерировались посредством механизма TNSA на тыльной поверхности алюминиевых фольг толщиной 6 мкм. При плотностях потока протонов меньше порогового значения, определяемого уровнем бесбойной работы, зарегистрированы сбои во внутренней памяти микроконтроллера. Количество сбоев за один импульс лазера экспоненциально растет при снижении напряжения питания. При номинальном напряжении питания сечение радиационных эффектов составило $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ см²/бит. Проведенные эксперименты демонстрируют возможность применения лазерных ускорителей для исследования одиночных радиационных эффектов в микроэлектронных устройствах.

K.V. SAFRONOV, V.A. PHLEGENTOV, N.N. SHAMAEVA, A.S. TISCHENKO, D.O. ZAMURAEV,
A.L. SHAMRAEV, S.F. KOVALEVA, N.A. FEDOROV, S.M. DUBROVSKIKH, A.S. PILIPENKO,
A.S. KUSTOV, E.A. SHIBAKOV, O.N. GILEV

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics (RFNC-VNIITF), Snezhinsk, Russia

RADIATION EFFECTS IN MICROELECTRONIC DEVICE UNDER IRRADIATION BY LASER ACCELERATED PROTONS

Exposure to high energy charged particles is one of the main hazards for spacecrafts. Even single particle can provoke failures in microelectronic devices of onboard equipment. Continuing reduction of microelectronic components scale leads to aggravation of the problem. Prior to installation into onboard equipment, microelectronic devices are usually tested at radiofrequency accelerators. Application of compact laser-plasma accelerators for this purpose can reduce duration and cost of test procedures.

We report on experiments at 200 TW femtosecond laser facility where single event effects in 180-nm microcontroller were observed after irradiation by laser accelerated protons. Protons with energies up to 6 MeV were generated on a back side of 6 μ m Al foils by TNSA mechanism. Errors in microcontroller internal memory were detected at proton flux densities less than fault level threshold. Single event effects cross-section constituted $5 \cdot 10^{-10}$ cm²/bit at nominal supply voltage. When the supply voltage is reduced the number of errors per laser shot grows exponentially. Our experiments demonstrate that laser accelerators can be applied for investigation of single event effects in microelectronic devices.

П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, А.А. НИКИТИН,
С.В. РОГОЖКИН

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР

Имитационные эксперименты на пучке тяжелых ионов, позволяющие анализировать радиационную стойкость конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов проводятся с 2009 года в Курчатовском Комплексе Теоретической и Экспериментальной Физики (ККЭТФ). Аттестация конструкционных материалов реакторов производится в исследовательских реакторах, но процесс занимает несколько лет, а сами образцы материалов становятся активированными, что затрудняет работу с ними в анализирующих установках. Выполнение имитационных экспериментов на ускорителе позволяет за несколько суток осуществить эксперимент с контролем условий его проведения (температура образцов мишени, профиль пучка на мишени, вакуум).

P.A. FEDIN, K.E. PRIANISHNIKOV, A.V. KOZLOV, T.V. KULEVOY, A.A. NIKITIN, S.V. ROGOZHNIKIN
NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

IMITATION EXPERIMENTS ON THE HEAVY ION ACCELERATOR HIPR

Imitation experiments on heavy ion beams make it possible to analyze the radiation resistance of structural materials of nuclear and thermonuclear reactors. These experiments have been carried out since 2009 at the Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics. Certification of structural materials of reactors carried out in reactor research, but the process takes several years, and specimens themselves become radioactive activated. This makes it difficult to work with them in the analysis. The implementation of imitation experiments at the accelerator makes it possible to carry out an experiment in a few days with the control of its conditions (temperature of the target specimens, beam profile on the target, vacuum).

Конструкционные материалы ядерных и термоядерных реакторов подвергаются воздействию нейтронного потока. В следствие этого возникают явления радиационного распухания конструкционного материала [1].

В ККЭТФ с 2009 года проводятся имитационные облучательные эксперименты на пучках тяжелых ионов на ускорителе ТИПр. Ускоритель работает с длительностью импульса 475 мкс, с частотой повторения 1 импульс через 2 секунды. На ускорителе ТИПр ионы достигают энергии 101 кэВ/нуклон благодаря ускоряющей структуре RFQ. В качестве ионного источника используется вакуумно-дуговой источник ионов металлов (ВДИИМ или MEVVA), что позволяет использовать любой твердый металл в качестве катода. Основные работы ведутся на ионах Fe^{2+} .

Во время облучения ведется контроль за положением пучка on-line с использованием профилометра. Также ведется контроль вакуума и температуры нагрева образцов. Три вида сборки для облучения мишеней образцов представлены на рисунке 1. Максимальный набранный флюенс на образцы составил $2,0 \cdot 10^{17}$ см⁻². Максимальная температура, которую обеспечивает система нагрева мишени составляет 600⁰С.



Рис. 1. Сборки с образцами: Ø3 мм (а), квадратные 10x10 мм (б), ВТСП лент (в)

Проведение имитационных экспериментов на ускорителях тяжелых ионов для проверки радиационной стойкости конструкционных материалов реакторов значительно уменьшает затрачиваемое на анализ время [2]. Доза, получаемая образцами в исследовательском реакторе за десять лет, набирается на тяжелоионном ускорителе за двое суток, при этом не образцы не активируются, что позволяет использовать различные методы анализа.

Список литературы

1. Рогожкин С.В. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. Том 9, №3. 2018. С. 245-258.
2. Was G.S. // Fundamentals of Radiation Materials Science. – Springer-Verlag, Berlin, 2007. 827 p.

Н.А. КЛЕОПОВА, М.А. КАРПОВ
ООО «Даймонд Вижн», Москва, Россия

НЕИНВАЗИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВ НА РЕНТГЕНОГРАММАХ

Предложен рентгенографический метод дистанционного неинвазивного определения химического состава различных биологических и неорганических объектов, содержащих различные химические вещества: жидкие суспензии, твердые композиты, обладающих сходными оптическими характеристиками. Метод позволяет определить химический состав жидкостей и твердых композиционных материалов в герметичных сосудах, вскрытие которых для отбора проб и последующего проведения химического анализа невозможно.

N.A. KLEKOVA
Diamond Vision LLC, Moscow, Russia

A NON-INVASIVE METHOD FOR DETERMINING THE CHEMICAL COMPOSITION OF SUBSTANCES ON X-RAY IMAGES

An X-ray imaging method for remote non-invasive determination of the chemical composition of various biological and inorganic objects containing various chemicals is proposed: liquid suspensions, solid composites with similar optical characteristics. The method makes it possible to determine the chemical composition of liquids and solid composite materials in sealed vessels, which cannot be opened for sampling and subsequent chemical analysis.

В ряде случаев существует необходимость неинвазивного определения химического состава веществ, находящихся в герметичной таре, вскрытие которой для проведения химического анализа стандартными методами невозможно: например, почтовой корреспонденции, запаянных капсул сохранения или контейнеров, содержащих чувствительные биологические объекты (трансфузионные донорские капсулы) и т.д. Некоторые вещества с различными химическими свойствами и составом могут проявлять сходные оптические свойства, что дополнительно затрудняет применение оптических методов контроля и диагностики. Предложенный метод основан на использовании высокочувствительного рентгеновского двумерного детектора рентгеновских изображений [1] и двух рентгеновских трубок с анодами из материалов, имеющих характеристические линии излучения в двух разнесенных диапазонах рентгеновского спектра. Производится последовательная съемка объекта обеими трубками на детектор, затем производится математическая обработка полученных рентгенограмм по массовой плотности объектов. Предложенный метод позволяет уверенно различать на рентгенограммах объекты различного химического состава с похожим оптическими свойствами, находящихся в герметичных капсулах (рисунок 1).

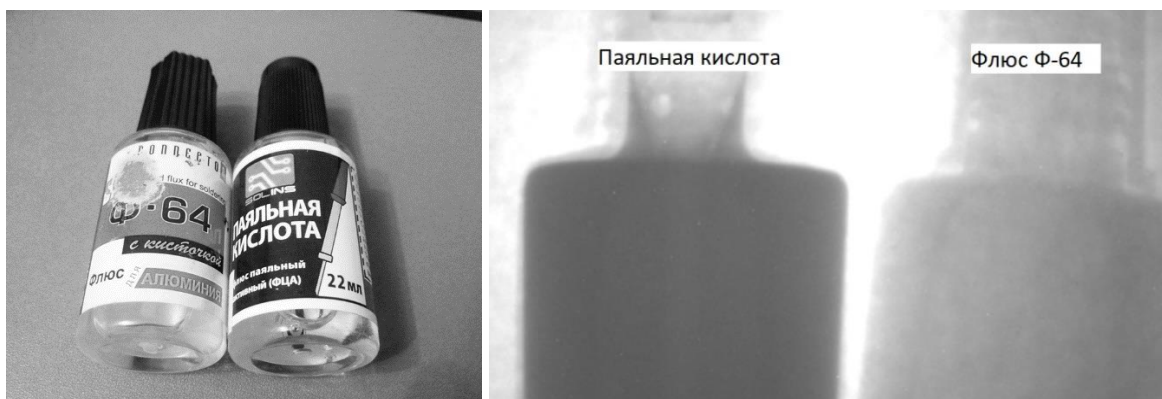


Рис. 1. Тестовые объекты рентгенографирования: флюс для пайки алюминия и паяльная кислота, и результаты их денситометрирования на рентгенограмме.

Предложенный метод может найти применение в системах дистанционной диагностики, досмотровых системах, экспресс-контроле на химических производствах, в добывающей промышленности.

Список литературы

1. Карпов М.А., Клеопова Н.А., Затолокин С.А. Регистратор кадровых рентгенографических изображений прямого преобразования с экспозицией от 5 нс для диапазона от 0,01 до 300 кэВ. В сборнике: Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2019. V Международная конференция. 2019. С. 224-226.

А.В. ПРОКОПЕНКО, К.Д. СМІРНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕТОДЫ ЭПР-СПЕКТРОСКОПИИ В РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Рассмотрены методы использования спектроскопии на основе электронного парамагнитного резонанса для использования при разработке радиационных технологий для измерения поглощенных доз электронного и гамма излучения и определения повреждений в облучаемом объекте. Изучена возможность использования ЭПР-спектрометра X-диапазона для прикладных исследований.

A.V. PROKOPENKO, K.D. SMIRNOV

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

EPR SPECTROSCOPY METHODS IN RADIATION TECHNOLOGIES

Methods for using spectroscopy based on electron paramagnetic resonance for use in the development of radiation technologies for measuring absorbed doses of electron and gamma radiation and determining damage in an irradiated object are considered. The possibility of using an X-band EPR spectrometer for applied research has been studied.

Одной из актуальных задач при разработке новых радиационных технологий является поиск точных и доступных методов позволяющих описать процессы происходящие при облучении органических веществ ускоренными электронами с энергиями от 0,1 МэВ до 10 МэВ и гамма излучением энергии до 7,5 МэВ. Одним из современных методов определения облученных органических материалов является спектроскопия на основе электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). На основе ЭПР методов исследования вещества возможно разработать методики для измерения поглощенных доз электронного и гамма излучения в веществе и технологии определения степени воздействия радиационного облучения на органические материалы и биологические объекты. Существующие методы пленочной дозиметрии, разработанные в 90-е годы прошлого века для контроля доз облучения на электронных ускорителях, имеют существенные ограничения по применению. ЭПР-спектрометрия с использованием дозиметрии на основе аланина хорошо исследована в мире. Аминокислота аланин является веществом, который при воздействии на него радиационного излучения в широком диапазоне, формирует определенные дефекты - стабильные свободные радикалы. В настоящее время также требуется широкое внедрение ЭПР-спектрометрии для исследования радиационного воздействия на полимерную, сельскохозяйственную и продовольственную продукцию.

Основная задача спектроскопии заключается в определении структуры и выяснении физической природы этих уровней путем спектрального анализа отклика вещества на воздействие на него электромагнитным излучением. Метод, основанный на явлении электронного парамагнитного резонанса, заключается в резонансном поглощении электромагнитного излучения в диапазоне частот примерно от 100 МГц до 1 ТГц веществами помещенными в постоянное магнитное поле, и обусловлено квантовыми переходами между энергетическими подуровнями, связанными с наличием магнитного момента у электронных систем.

Метод ЭПР применяется для исследования парамагнитных центров и их окружения в веществе. Преимущество метода ЭПР заключается в возможности определения концентрации и идентификации парамагнитных частиц в любом агрегатном состоянии. Он позволяет детектировать свободные радикалы в количестве до 10^{-10} – 10^{-13} М. В ЭПР-спектроскопии образец может представлять собой не только твердое вещество, жидкость или газ, но также разнообразные растворы и даже суспензии клеток. При этом отсутствует прямой контакт с образцом, что позволяет сохранить его для дальнейшего анализа.

Метод ЭПР-спектроскопии широко применяется в фундаментальных и прикладных исследованиях, таких как химия, биотехнология, медицина, фармацевтика, материаловедение, пищевая промышленность, геология, нефтехимия и многих других областях. На рынке представлена широкая линейка ЭПР-спектрометров от разных производителей, таких как Bruker, Fizepr, Спектр и других. В большинстве ЭПР-спектрометров работают с электромагнитным полем микроволнового диапазона, а именно с частотами X-диапазона около 9 ГГц. ЭПР-спектрометры различаются по таким характеристикам, как рабочая частота, чувствительность и стабильность, максимальная индукция магнитного поля, амплитуда и частота модуляции магнитного поля, диапазон изменения СВЧ-мощности.

Для проведения исследований по тематике радиационных технологий на основе пучков заряженных частиц и потоков излучений в НИЯУ МИФИ рассматривается возможность покупки различных ЭПР-спектрометров X-диапазона с комплектами оснастки и программным обеспечением. Выполнено сравнение оборудования разных производителей. Особый интерес представляют ЭПР-спектрометры серии «LABRADOR» фирмы ООО «Спектр» с комплектом дозиметров, состоящих из гранул аланина, которые используются в ЭПР-спектрометре для проведения измерений накопленной дозы радиации.

К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, П.А. ФЕДИН, В.К. СЕМЯЧКИН, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

МИШЕННАЯ КАМЕРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На тяжелоионном ускорителе ТИПр-1 проводятся эксперименты по имитации нейтронного воздействия на конструкционные материалы ядерных и термоядерных реакторов. Для модернизации установки ТИПр-1 разработана мишенная камера. Мишенная камера предусматривает облучение одновременно двумя пучками ионов: тяжелыми и легкими. Имитационные эксперименты на двух пучках ионов позволяют полностью моделировать процесс, происходящий в ядерных и термоядерных реакторах. Тяжелые ионы имитируют нейтронное воздействие, а имплантация ионов гелия повторяет процесс газового и вакансионного распухания в материалах реактора.

K.E. PRYANISHNIKOV, P.A. FEDIN, V.K. SEMYACHKIN, A.V. KOZLOV, T.V. KULEVOY

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

TARGET CHAMBER FOR SIMULATION OF NEUTRON IMPACT EXPERIMENTS

Experiments are being carried out to simulate the neutron impact on the structural materials of nuclear and thermonuclear reactors at the heavy ion accelerator HIPr-1. A target chamber has been developed for the modernization of facility the HIPr-1. The target chamber provides simultaneous irradiation with two beams of ions: heavy and light. Irradiation experiments on two ion beams make it possible to fully simulate the process occurring in nuclear and thermonuclear reactors. Heavy ions imitate the neutron effect, and the implantation of helium ions repeats the process of gaseous and vacancy swelling in the reactor materials.

После появления реакторов на быстрых нейтронах конструкционные компоненты реактора стали подвергаться воздействию более значительных доз быстрых нейтронов. После продолжительной работы реакторов при определенных температурах оболочка реакторов из нержавеющей стали подвергается изменениям плотности в результате пористости, т.е. образования и роста пустот в материале. При проведении эксперимента в исследовательском реакторе причину появления данного эффекта сложно понять поскольку отсутствует возможность регулировки процессов образования гелия и водорода. Используя для моделирования радиационных повреждений пучки ускоренных ионов можно регулировать как скорость образования в исследуемом образце дефектов, так и поток имплантации ионов He^+ [1]. Помимо этого, эксперимент, проведенный на ускорителе, позволяет отслеживать температуру нагрева образцов конструкционных материалов, вакуум. Образцы после облучения на ускорителе радиационно не активируются, что заметно облегчает их последующий анализ.

На тяжелоионном ускорителе ТИПр-1 проводятся эксперименты по имитации нейтронного воздействия на конструкционные материалы ядерных и термоядерных реакторов. Имитационные эксперименты на двух пучках ионов позволяют полностью моделировать процесс, происходящий в ядерных и термоядерных реакторах. Тяжелые ионы имитируют нейтронное воздействие, а имплантация ионов гелия повторяет процесс газового и вакансионного распухания в материалах реактора. Для проведения двухпучковых экспериментов на установке ТИПр-1 разработана мишенная камера. Разработанная мишенная камера представлена на рисунке 1. Пучки ионов сходятся на мишени под углом в 30° . Мишенная камера предусматривает установку системы диагностики пучка, системы плазменной чистки, тепловизора, ПЗС-камеры и блока азотной ловушки. На каждый из пучковых каналов предполагается установка системы диагностики в виде профилометра и цилиндра Фарадея. Профилометры позволяют контролировать ток и профиль пучка во время всего сеанса облучения.

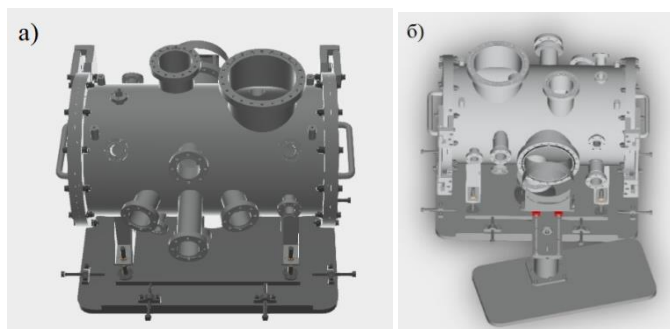


Рис. 1. Мишенная камера на подставке: а) вид со стороны входа пучков, б) вид со стороны мишенного блока

Мишенная камера оборудована двумя герметичными дверьми, которые позволяют устанавливать образцы на мишень, когда азотная ловушка не установлена в камеру. В случае использования азотной ловушки для монтажа образцов предусмотрен механизм перемещения блока установки и нагрева мишени.

Список литературы

1. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А. и другие // Ядерные физика и технологии. Том 9, №3. 2018. С. 245-258.

**Секция
ФИЗИКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ**

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., профессор
Губин Сергей Александрович

Секретарь секции

– Маклашова
Ирина Владимировна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9917

E-mail: SAGubin@mephi.ru, IVMaklashova@mephi.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

Разработана методика определения параметров двухпараметрического потенциала взаимодействия Леннарда-Джонса для повышения точности теоретического уравнения состояния на основе теории возмущений. Результаты термодинамического моделирования изотермического сжатия ксенона с найденными потенциальными параметрами по разработанной методике согласуются с данными молекулярно-динамического моделирования.

Yu.A. BOGDANOVA, Yu.A. USTYANTSEVA, M.A. BASKAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

OPTIMIZATION OF THE THEORETICAL MODEL OF THE EQUATION OF STATE

A technique for determining the parameters of the two-parameter Lennard-Jones interaction potential has been developed to improve the accuracy of the theoretical equation of state based on perturbation theory. The results of thermodynamic modeling of xenon isothermal compression with the found potential parameters according to the developed method are consistent with the data of molecular dynamics modeling.

Реалистичное прогнозирование термодинамических свойств многокомпонентных многофазных систем в широком диапазоне изменения давления, температур, в том числе в области экстремально высоких является важной задачей в различных областях науки и техники. Достоверность рассчитываемых термодинамических свойств определяется надежностью моделей уравнения состояния (УРС), используемых для описания исследуемых систем.

Разработанная на основе теории возмущений модель УРС [1] является надежным инструментом для расчета свойств индивидуальных и двухкомпонентных систем с использованием различных типов потенциалов межмолекулярного взаимодействия. В [2] показано влияние параметров потенциалов взаимодействия на точность расчетов термодинамических величин. Поэтому целью данной работы является оптимизация разработанной в [1] модели УРС путем калибровки потенциальных параметров для повышения точности прогнозируемых свойств веществ. На основе метода наименьших квадратов разработана методика определения параметров потенциала Леннарда-Джонса. Идея метода заключается в решении обратной термодинамической задачи, где определяются такие значения искомых потенциальных параметров, которые минимизируют сумму среднеквадратичных отклонений расчетных термодинамических величин от соответствующих экспериментальных результатов. В данной работе методика была применена для определения потенциальных параметров ксенона. В результате выполнения расчетов получены следующие значения параметров: $\sigma=3.92$ А и $\epsilon/k_B=215.5$ К. На рис.1 представлена расчетная изотерма 350 К с использованием найденных значений потенциальных параметров в согласии с данными NIST [3] и результатами моделирования [4].

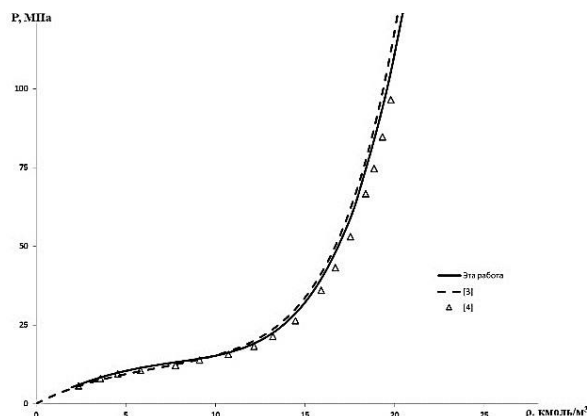


Рис. 1. Изотермическое сжатия ксенона при 350 К

Как видно из рис.1, результаты расчетов находятся в согласии с экспериментальными данными, относительная погрешность отклонения рассчитанных величин не превышает 1 %. В дальнейшем планируется увеличить количество данных для калибровки потенциалов, а также реализовать алгоритм для высокопроизводительных вычислительных систем, что позволит увеличить точность расчетов и повысить производительность.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания №07232020-0036).

Список литературы

1. Bogdanova Yu.A., Gubin S.A., Victorov S.B., Gubina T.V. // High Temperature. 2015. V. 53, № 4. P. 481.
2. Bogdanova Yu.A., Maklashova I.V., Gubin S.A., Amir Zh.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. № 1. 012075
3. NIST Chemistry WebBook. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>.
4. Tan S., Do D., Nicholson D. Molecular Simulation. DOI: 10.1080/08927022.2018.1498976

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ АДИАБАТ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ

Показана применимость универсальной теоретической модели уравнения состояния для расчета параметров ударного сжатия бинарных сплавов металлов. Модель уравнения состояния разработана на основе термодинамической теории возмущений. Для описания взаимодействия между частицами металлов использовался парный потенциал Морзе. Результаты расчетов давления и скорости ударных волн для исследуемых в работе бинарных сплавов металлов согласуются с доступными экспериментальными данными.

Yu.A. BOGDANOVA, S.A. GUBIN, A.D. TROFIMOVA, A.A. EGOROV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

THERMODYNAMIC MODELING OF SHOCK HUGONIOT OF BINARY METAL ALLOYS

The applicability of the universal theoretical model of the equation of state for calculating the shock Hugoniot of binary metal alloys is shown. The equation of state model was developed on the basis of thermodynamic perturbation theory. The Morse pair potential was used to describe the interaction between metal particles. The results of calculations of the pressure and velocity of the shock wave for the binary metal alloys studied in this work are consistent with the available experimental data.

Теоретические обоснованные модели уравнения состояния (УРС) широко используются для моделирования свойств плотных флюидных систем. Эти модели УРС построены на базе современных методов статистической механики и реалистичных потенциалов взаимодействия молекул. В [1] на основе теории возмущений KLR-Г была разработана модель УРС, реализованная в виде вычислительной программы, позволяющая рассчитывать термодинамические свойства как однокомпонентных систем, так и бинарных смесей. В [2] продемонстрировано успешное применение разработанной модели УРС для расчета термодинамических свойств веществ в любом агрегатном состоянии: газ, жидкость или твердое тело.

В [3] показано, что результаты расчетов термодинамических параметров изотермического сжатия алюминия и меди, а также их бинарных сплавов согласуются с экспериментальными данными и результатами молекулярно-динамического моделирования.

В данной работе на основе разработанной модели УРС [2] выполнено термодинамическое моделирование ударного сжатия бинарных сплавов различных металлов в широкой области давлений и температур. Для описания взаимодействия между частицами металлов использовался парный потенциал Морзе. Рассчитаны значения давлений ударного сжатия и скорости ударных волн. Результаты расчетов для бинарного сплава Ni-Cu (50%-50% по массе) представлены на рис. 1 в виде PV -диаграммы и зависимости скорости ударной волны от давления.

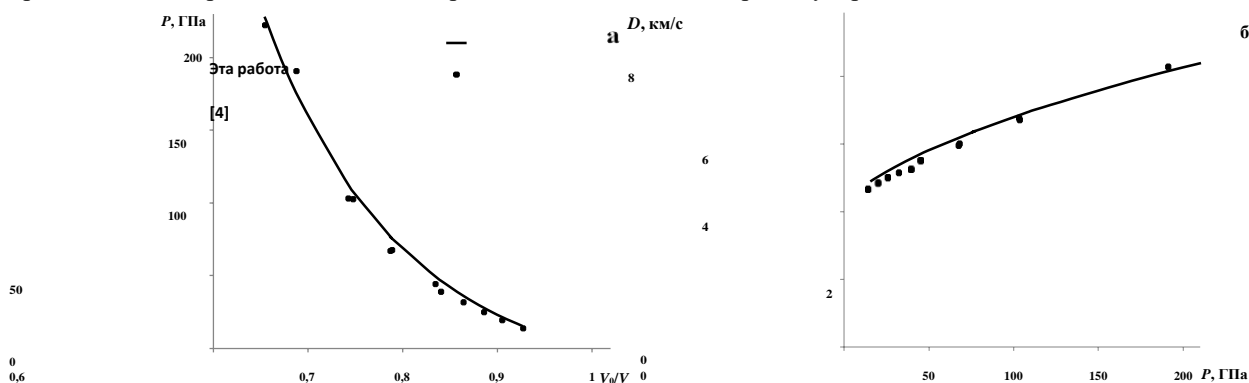


Рис. 1. (а) Ударная адиабата бинарного сплава Ni-Cu (50%-50%). (б) Зависимость скорости ударной волны от давления для сплава Ni-Cu (50%-50%)

Как видно из рис. 1, результаты термодинамического моделирования согласуются с экспериментальными данными [4]. Таким образом, разработанная модель УРС позволяет рассчитать свойства как индивидуальных веществ, в том числе металлов, так и их бинарных смесей/сплавов при статическом и ударно-волновом сжатии.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания №07232020-0036).

Список литературы

1. Bogdanova Yu.A., Gubin S.A., Victorov S.B., Gubina T.V. // High Temperature. 2015. V. 53, № 4. P. 481.
2. Богданова Ю.А., Маклашова И.В., Губин С.А. // V Международная конференция ЛаПлаз-2019. 2019. С. 261
3. Bogdanova Y.A., Gubin S.A., Maklashova I.V. // Metals. 2021. V. 11. № 10. 1548.
4. Белякова М.Ю., Жерноклетов М.В., Сутулов Ю.Н., Трунин Р.Ф. // Изв. АН СССР. Сер. Физика. 1991. № 1. С. 99.

С. В. БОГОМОЛОВ

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ЛАГРАНЖЕВА СТОХАСТИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ИЕРАРХИЯ

Большая часть научных вычислений посвящена вычислительному эксперименту, связанному с уравнением Больцмана, обоснованию методов Монте-Карло. Вероятностный подход, основанный на стохастических дифференциальных уравнениях, был разработан А.В. Скороходом, а применительно к кинетическим уравнениям - А.А. Арсеновым при вычислительной поддержке А.В. Лукшина. Мы покажем, как простейшая, но далеко не тривиальная модель газа из твердых сфер приводит к микро- мезо- макроиерархии в порядке убывания числа Кнудсена, благодаря переходам описания с использованием случайных процессов от прерывистого к диффузионному в шестимерном фазовом пространстве с редукцией к трехмерному. Такая цепочка позволяет нам уточнять уравнения Больцмана, Фоккера-Планка-Колмогорова и Навье-Стокса, а также позволяет нам строить сквозные алгоритмы в рамках унифицированных методов частиц, стохастических и детерминированных.

S. V. BOGOMOLOV

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

LAGRANGE STOCHASTIC GAS DYNAMIC HIERARCHY

Most of the scientific calculations are devoted to the computational experiment related to the Boltzmann equation, the substantiation of Monte Carlo methods. The probabilistic approach based on stochastic differential equations was developed by A.V. Skorokhod, and applied to kinetic equations by A.A. Arsenov with the computational support of A.V. Lukshin. We will show how the simplest, but far from trivial, model of a gas from solid spheres leads to a micro-meso-macro hierarchy in descending order of the Knudsen number, due to the transitions of the description using random processes from discontinuous to diffusive in a six-dimensional phase space with reduction to three-dimensional. Such a chain allows us to refine the Boltzmann, Fokker-Planck-Kolmogorov and Navier-Stokes equations, and also allows us to build end-to-end algorithms within the framework of unified particle methods, stochastic and deterministic.

Математические модели газовой динамики и её вычислительная индустрия, на наш взгляд, далеки от совершенства. Мы посмотрим на эту проблематику с точки зрения ясной вероятностной микро — модели газа из твёрдых сфер, опираясь как на теорию случайных процессов, так и на классическую кинетическую теорию в терминах плотностей функций распределения в фазовом пространстве, а именно, построим сначала систему нелинейных стохастических дифференциальных уравнений (СДУ), а затем — обобщённое случайное и неслучайное интегро – дифференциальное уравнение Больцмана с учётом корреляций и флуктуаций. Ключевой особенностью исходной модели является случайный характер интенсивности скачкообразной меры и её зависимость от самого процесса.

Кратко напомним переход ко всё более грубым мезо – макро приближениям в соответствии с уменьшением параметра обезразмеривания, числа Кнудсена. Получим стохастические и неслучайные уравнения, сначала в фазовом пространстве (мезо – модель в терминах СДУ по винеровским мерам и уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка), а затем — в координатном пространстве (макро – уравнения, отличающиеся от системы уравнений Навье – Стокса и систем квазигазодинамики). Главным отличием этого вывода является более точное осреднение по скорости благодаря аналитическому решению стохастических дифференциальных уравнений по винеровской мере, в виде которых представлена промежуточная мезо – модель в фазовом пространстве. Такой подход существенно отличается от традиционного, использующего не сам случайный процесс, а его функцию распределения. Акцент ставится на прозрачности допущений при переходе от одного уровня детализации к другому, а не на численных экспериментах, в которых содержатся дополнительные погрешности аппроксимации.

Теоретическая мощь микроскопического представления макроскопических явлений важна и как идейная опора методов частиц, альтернативных разностным и конечно – элементным.

Ключевые слова: уравнение Больцмана, уравнение Колмогорова – Фоккера – Планка, уравнение Навье – Стокса, уравнения стохастической газодинамики и квазигазодинамики, стохастические дифференциальные уравнения по бернуллиевой и винеровской мерам, методы частиц.

Список литературы

1. Bogomolov S. V., Zakharova T. V. //Mathematical Models and Computer Simulations. 2021. Vol. 13 (5). P. 743—755.

К. А. БЫРДИН¹, В. А. СМЕТАНЮК¹, С. М. ФРОЛОВ^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ

Воспламенение и горение струй жидкого керосина в камерах сгорания – сложный физико-химический процесс. Понимание такого процесса необходимо при оптимизации конструктивных и режимных параметров камер сгорания. Многомерное моделирование течения двухфазной реагирующей среды, как правило, включает несколько физико-математических подмоделей различных сопутствующих элементарных процессов: движения капель, их прогрева, испарения, деформации и дробления, самовоспламенения паров горючего, молекулярного и турбулентного переноса массы, импульса и энергии, а также протекания газофазных химических реакций. Разумеется, все использованные подмодели должны быть корректны сами по себе и согласованы друг с другом. В работе представлены модели таких элементарных физических и химических процессов, а также результаты их согласования на примере трехмерной задачи о самовоспламенении струи жидкого керосина в камере сгорания постоянного объема.

K.A. BYRDIN¹, V.A. SMETANUYK¹, S.M. FROLOV^{1,2}

¹N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

MODELING OF FUEL JET IGNITION AND COMBUSTION

Ignition and combustion of sprays of liquid kerosene in combustion chambers is a complex physical and chemical process. Understanding this process is required for optimizing the design and operating parameters of combustion chambers. Multidimensional modeling of a two-phase reacting flow, as a rule, includes several physical and mathematical submodels of various accompanying elementary processes, namely, drop motion, heating, evaporation, deformation and breakup, self-ignition of fuel vapors, molecular and turbulent transport of mass, momentum and energy, as well as gas-phase chemical reactions. It goes without saying that all the submodels must be adequate themselves and compatible with each other. The paper presents the performances of such individual models as well as their combination on the example of a three-dimensional problem of self-ignition of a liquid kerosene spray in a constant-volume combustion chamber.

Расчет самовоспламенения струи жидкого топлива (керосина) требует совместного использования моделей дисперсной среды и газофазных реакций. Результат расчета определяется достоверностью моделирования каждого элементарного процесса и всего явления в целом. В работе газофазное окисление жидкого керосина моделировали помощью глобального и детального кинетического механизма *n*-додекана или суррогата, состоящего из 9 нормальных алканов с числом атомов углерода от 8 до 16 [1]. Для описания нагрева/испарения и дробления капель керосина использовали модель [2] и WAVE модель [3] соответственно. Модель испарения проверена путем сравнения с экспериментами в условиях микрогравитации: получено удовлетворительное согласие результатов по величине константы испарения *k* и по времени испарения капли. Так, для капель *n*-декана, различие по величине *k* между расчетами и экспериментами составило менее 6%. Для капель *n*-гексадекана максимальная ошибка по *k* не превышала 50%. Отметим, что при использовании стандартной модели Дуковича ошибка определения константы испарения *k* достигала 100% и более. Модель дробления содержит две модельных константы. Корректировка константы, определяющей время дробления капли, позволила получить хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов в задаче о поперечном впрыске струи керосина в холодный поток. В задаче о самовоспламенении струи керосина в камере постоянного объема использованы как детальный, так и глобальный кинетические механизмы, причем глобальный кинетический механизм содержал 9 компонент и 7 реакций. Применение глобального механизма позволило получить удовлетворительное согласие результатов по задержкам самовоспламенения струи, полученным с помощью детального механизма (отличие менее чем в 1,5 – 2 раза), а также с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Басевич В.Я., Беляев А.А., Медведев С.Н., Посвянский В.С., Фролов С.М. // Горение и взрыв. 2015. Т. 8, № 1. С. 21-28
2. Frolov S. M., Frolov F. S., Basara B. // Journal of Russian Laser Research. 2006. V. 27.6. P. 562-574.
3. Reitz R.D. // Atomisation and Sprays Tech. 1987. V. 3. P.309-337,

П.А. ВЛАСОВ¹, В.Н. СМИРНОВ¹, Н.С. МАЛЫШЕВ¹,
Д.И. МИХАЙЛОВ¹, Г.Л. АГАФОНОВ¹, В.А. ПОЛЯНСКИЙ², И.Л. ПАНКРАТЬЕВА²

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской Академии наук, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ С ХИМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ С ЛИНИЕЙ ЛЕХЕРА И С РУПОРНО-ЛИНЗОВОЙ СИСТЕМАМИ ВВОДА СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ИССЛЕДУЕМУЮ ПЛАЗМУ

Проведены эксперименты на ударной трубе в отраженных ударных волнах по измерению концентрации свободных электронов СВЧ-интерферометрами различной конструкции и электрических токов на цилиндрические зонды с проводящей поверхностью. Образование плазмы происходило в результате реакций химической ионизации при окислении различных углеводородов. Цилиндрические проводники линии Лехера СВЧ-интерферометра использовались как электрические зонды для измерения полных токов. Проведено количественное сравнение результатов определения концентрации свободных электронов СВЧ-интерферометрами с разными системами ввода зондирующего СВЧ-излучения, а также концентрации свободных электронов, определяемой из полных токов на цилиндрические зонды. Эксперименты проводились с различными бедными смесями метана и ацетилена с кислородом в аргоне. Предложена детальная кинетическая модель химической ионизации при окислении простейших углеводородов. Сравнение результатов расчетов концентрации свободных электронов с результатами СВЧ-измерений показало их хорошее согласие. Это позволило провести сравнение результатов, полученных с использованием нашего СВЧ-интерферометра, с аналогичными результатами других авторов, полученными СВЧ-интерферометром другой конструкции, работающим на более высоких частотах.

P.A. VLASOV¹, V.N. SMIRNOV¹, N.S. MALYSHEV¹,
D.I. MIKHAILOV¹, G.L. AGAFONOV¹, V.A. POLYANSKIY², I.L. PANKRATYEVA²

¹Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

DIAGNOSTICS OF PLASMA WITH CHEMICAL IONIZATION REACTIONS BY MICROWAVE INTERFEROMETERS WITH A LECHER LINE AND WITH HORN-LENS SYSTEMS FOR INTRODUCING MICROWAVE RADIATION INTO THE PLASMA BEING INVESTIGATED

Experiments on measuring the concentration of free electrons by microwave interferometers of various designs and electric currents to cylindrical probes were conducted on a shock tube in reflected shock waves. Plasma was formed by chemical ionization reactions during the oxidation of various hydrocarbons. The cylindrical conductors of the Lecher line of the microwave interferometer were used as electric probes for measuring total currents. A quantitative comparison of the results of determining the concentration of free electrons by microwave interferometers with the different input systems of probing microwave radiation, as well as the concentration of free electrons determined from the total currents to cylindrical probes was carried out. Various lean mixtures of methane and acetylene with oxygen diluted with argon were investigated. A detailed kinetic model of chemical ionization during the oxidation of simplest hydrocarbons was proposed. Comparison of the results of calculations of the concentration of free electrons with the results of microwave measurements showed their good agreement. This made it possible to compare the result obtained using our microwave interferometer with similar results of other authors obtained by a microwave interferometer of a different design operating at higher frequencies.

При окислении углеводородов за счет процессов химической ионизации образуется низкотемпературная плазма относительно низкой концентрацией свободных электронов (10^9 — 10^{12} см⁻³). Для диагностики такой плазмы используются электрические зонды и микроволновые методы, наиболее чувствительным из которых является микроволновая интерферометрия. Используются электромагнитные волны сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Для ввода зондирующего излучения в исследуемую плазму используют рупорно-линзовые системы, либотак называемую двухпроводную линию Лехера. Рупорно-линзовые системы не контактируют с исследуемой плазмой и не вносят каких-либо дополнительных возмущений в параметры плазмы. Двухпроводная линия Лехера состоит из двух цилиндрических проводников, вокруг которых сосредоточено электромагнитное зондирующее поле. При этом эти проводники можно использовать и как электрические зонды. Однако, возникает вопрос насколько сильно линия Лехера искажает параметры исследуемой плазмы. В данной работе для решения этого вопроса проведено прямое сравнение результатов измерения параметров плазмы, образующейся за фронтом отраженной ударной волны при окислении бедных смесей метана и ацетилена, СВЧ-интерферометрами с рупорно-линзовой системой ввода СВЧ-излучения и с двухпроводной линией Лехера. Обнаружено хорошее согласие временных зависимостей концентрации свободных электронов, полученных при помощи этих двух интерферометров. Проведен анализ возможных факторов, влияющих на измерения интерферометра с двухпроводной линией Лехера. Проведены оценки точности определения концентрации свободных электронов и пространственно-временного разрешения интерферометра. Предложена детальная кинетическая модель химической ионизации при окислении простейших углеводородов. По этой модели проведены кинетические расчеты концентрации свободных электронов в зависимости от времени для исследуемых смесей и проведено прямое сравнение результатов кинетических расчетов и экспериментальных измерений СВЧ-интерферометром с двухпроводной линией Лехера. Получено их хорошее согласие. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными результатами СВЧ-измерений других авторов.

С.В. ГОРКУНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЭВОЛЮЦИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Построен алгоритм для численного моделирования в двухмерной постановке эволюции ударной волны с явным выделением фронта. Показано, что результаты численного расчета в случае малых возмущений согласуются с аналитическим решением в линейном приближении. Увеличение амплитуды возмущений приводит к повышению средней скорости распространения ударной волны.

S.V. GORKUNOV

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

EVOLUTION OF SINUSOIDAL PERTURBATIONS OF THE SHOCK WAVE FRONT

An algorithm for numerical simulation in a two-dimensional formulation of the evolution of a shock wave with high-order shock-fitting method. The results of numerical calculations in the case of small perturbations are consistent with the analytical solution of the linearized system of equations. Increasing perturbation amplitude leads to an increase in the average velocity of the shock wave.

Рассматривается случай двумерного невязкого, не теплопроводящего течения, когда в положительном направлении оси Y распространяется плоская ударная волна со скоростью D_0 . Наложим на фронт ударной волны малые синусоидальное возмущение вида: $A(x,t) = A_0 \exp(k_x x + i\omega t)$, где A_0 – амплитуда возмущений, k_x – волновой вектор, ω – частота возмущения. Для определения эволюции возмущения предлагается использовать численное моделирование. При этом моделирование проводится в криволинейных координатах с целью явного выделения фронта ударной волны [1]. Криволинейная система координат (ξ, η, τ) выбирается так, что положение фронта ударной волны в преобразованных координатах описывается уравнением $\eta=1$. Такой подход позволяет наложить на расчетную область прямоугольную расчетную сетку в криволинейных координатах и использовать численные методы высокого порядка точности.

Уравнения, описывающие движение газа в преобразованных координатах представляются в виде:

$$-\frac{1}{J} \frac{\partial U}{\partial \tau} - F' \frac{\partial}{\partial \xi} - G' \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{1}{J} \right) = 0$$

где, $F' = J^{-1} (U \frac{\partial \xi}{\partial t} \pm F \frac{\partial \xi}{\partial x} \pm G \frac{\partial \xi}{\partial y})$, $G' = J^{-1} (U \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm F \frac{\partial \eta}{\partial x} \pm G \frac{\partial \eta}{\partial y})$, J – Якобиан преобразования координат, $U^T =$

$(\rho, \rho u, \rho v, E)$, $F^T = (\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, u(E + p))$, $G^T = (\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, v(E + p))$, ρ – плотность, u, v – x, y компоненты скорости, $E = \rho(e + 0.5(v^2 + u^2))$, e – внутренняя энергия.

Аппроксимация пространственных производных производится методом WENOM5 [2]. Для вычисления $\frac{\partial}{\partial \eta}$ вблизи

фронта ударной волны используются односторонние аппроксимации высокого порядка точности:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \eta} \right|_{\eta} = \frac{1}{60\Delta} (-12 f_{L-5} + 25 f_{L-4} - 20 f_{L-3} + 30 f_{L-2} - 20 f_{L-1} + 137 f_L) + O(\Delta \eta^5)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \eta} \right|_{\eta=\eta_{L-1}} = \frac{1}{12\Delta} (-f_{L-4} + 6f_{L-3} - 18f_{L-2} + 10f_{L-1} + 3f_L) + O(\Delta \eta^4)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \eta} \right|_{\eta=\eta_{L-2}} = (2f_{L-5} + 15f_{L-4} - 60f_{L-3} + 20f_{L-2} - 30f_{L-1} - 3f_L) + O(\Delta \eta^5)$$

здесь индекс L указывает на расчетные ячейки, находящиеся непосредственно за фронтом ударной

Численное интегрирование осуществляется 6-ти проходным методом Рунге-Кутты пятого порядка точности.

Описанные вычислительные процедуры позволяют моделировать эволюцию фронта ударной волны с высоким порядком точности. С целью верификации программы проведено моделирование синусоидальных возмущений фронта ударной волны. Результаты численного моделирования сравнивались с результатами аналитического решения в линейном приближении эволюции синусоидальных возмущений фронта ударной волны. В случае малых возмущений получено хорошее согласие численного расчета и решения в линейном приближении.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания №07232020-0036).

Список литературы

- Pradeep S. R., Zhong X. // Journal of Computational Physics 2010. V. 229, № 19. P. 6744–6780.
- Henrick A. K., Aslam T. D., Powers J. M. // Journal of Computational Physics. 2005. V. 207. P. 542–567.

В.Г. КИРИЛЕНКО¹, Л.И. ГРИШИН^{2,3}, А.Ю. ДОЛГОБОРОДОВ^{1,2,3}, М.А. БРАЖНИКОВ¹, М.Л. КУСКОВ¹, Г.Е. ВАЛЬЯНО²

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ НАНОТЕРМИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОАЛЮМИНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

В работе приведены результаты исследования процесса лазерного инициирования термитных смесей наноразмерных порошков Al с оксидами меди, висмута, молибдена и никеля. Получены новые данные о минимальной энергии инициирования и скорости горения в зависимости от плотности и соотношения компонентов. Иницирование осуществлялось импульсом лазерного диода с длиной волны 808 нм, плотность мощности излучения до 700 Вт/см². Параметры процесса регистрировались с помощью многоканального пирометра и высокоскоростной видеокамеры. Проведено измерение яркостной температуры продуктов горения нанотермитов. Изучено влияние инертных светопоглощающих наноразмерных добавок на пороговые параметры лазерного импульса и скорость горения. На основании полученных результатов выдвинуты предположения о механизме инициирования и протекании реакции при воздействии лазерного излучения.

V.G. KIRILENKO¹, L.I. GRISHIN^{2,3}, A.Yu. DOLGOBORODOV^{1,2,3}, M.A. BRAZNIKOV¹, M.L. KUSKOV¹, G.E. VALYANO²

¹N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

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

FEATURES OF COMBUSTION OF NANOTHERMITE BASED ON NANOALUMINUM AT LASER INITIATION

The work is devoted to thermites based on mixtures of nanosized Al with oxides of copper, bismuth, molybdenum and nickel. In this work, new data were obtained on the minimum initiation energy and combustion rate depending on the density and the ratio of the components. The thermites were initiated by a laser diode pulse with a wavelength of 808 nm and a radiation power density of up to 800 W/cm². The parameters of ignition and burning were recorded using a multi-channel pyrometer and a high-speed video camera. The brightness temperature of the combustion products of nanothermites has been measured. The effect that inert light-absorbing nanosized additives have on the threshold parameters of the laser-induced initiation and the burning rate of the mixtures has been studied. Based on the results obtained, the assumptions were made regarding the mechanism of initiation and process of reaction induced by laser pulse radiation.

Экспериментально измерены задержки воспламенения, минимальная энергия инициирования лазерным излучением и скорость горения для НТ Al/CuO, Al/Bi₂O₃, Al/MoO₃ и Al/NiO.

Определены зависимости скорости горения и энергии инициирующего лазерного импульса от пористости НТ. Показано, что с увеличением плотности скорость горения НТ резко падает. Полученные результаты подтверждают ведущую роль механизма конвективного горения при низких плотностях с плавным переходом к более медленно-кондуктивному режиму распространения при снижении пористости НТ.

Исследовано влияние светопоглощающих добавок на порог инициирования НТ. Более чем в два раза снизились минимальные критические параметры инициирования для Al/CuO с добавкой 1% сажи.

Проведены измерения яркостной температуры продуктов горения для НТ. Наиболее резкое нарастание температуры и ее максимальное значение получено для Al/CuO.

Показано, что скорость горения НТ Al/CuO в закрытых трубках возрастает с увеличением их длины почти на 200 м/с; этот эффект может быть связан с существенным ростом давления в условиях затрудненного разлета продуктов реакции.

Получены данные скоростной видеосъемки, подтверждающие очаговый характер инициирования и конвективный механизм горения исследованных НТ; выявлен характер формирующегося фронта горения в высокопористых составах при наличии градиента плотности в направлении, перпендикулярном распространению процесса.

С.А. ГУБИН, А.В. КУДИНОВ, И.В. МАКЛАШОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИКИ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ УЛЬТРА БЫСТРОМ ОХЛАЖДЕНИИ ГАЗА ИЗ АТОМОВ УГЛЕРОДА

С помощью термодинамического и молекулярно-динамического (МД) моделирования показаны возможные пути образования углеродных наночастиц при ультра быстром охлаждении нагретого до высокой температуры углеродного газа: сублимация из газовой фазы и фазовый переход из жидкой в конденсированную фазу. Три параметризации реакционно-силовых полей ReaxFF-CHO, ReaxFF-c2013, ReaxFF-PAH рекомендованы для расчетов образования углеродных наночастиц.

S.A. GUBIN, A.V. KUDINOV, I.V. MAKLASHOVA

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

THERMODYNAMIC AND MOLECULAR DYNAMIC SIMULATION OF CARBON NANOPARTICLES FORMATION FROM CARBON GAS DURING RAPID COOLING

By means of quasi-equilibrium thermodynamic and molecular dynamics (MD) modeling of the process of nanoparticle formation during rapid cooling of a heated carbon gas, two possible pathways for the nanocarbon particles synthesis are shown: condensation from the gas phase or phase transformation from a liquid phase to a condensed one. Three parameterizations of the reaction force fields (ReaxFF-CHO, ReaxFF-c2013, ReaxFF-PAH) are recommended for modeling of the nanocarbon particles formation.

Наноуглеродные структуры: фуллерены, нанотрубки, наноалмазы, графены и другие представляют большой интерес из-за своих необычных теплофизических свойств. Однако исследовать эволюцию формирования на атомарном уровне углеродных наноструктур из небольших углеродных фрагментов можно только средствами математического моделирования методами молекулярно-динамического и квантового моделирования, которые позволяют визуализировать процессы зарождения и роста наночастиц из атомов углерода в неравновесных условиях.

Целью работы является исследование образования наночастиц при быстром охлаждении углеродного газа и выбор оптимальных реакционных силовых полей Reactive Force Field (ReaxFF) [1] (из параметризаций ReaxFF). Для этого в работе выполнены термодинамическое и молекулярно-динамическое моделирование (МД) образования углеродных наночастиц при быстром остывании газа из углеродных атомов. Термодинамические расчеты проводились в программном комплексе термодинамических расчетов TDS [2]. Для моделирования условий быстрого остывания нагретого до высокой температуры углеродного газа в расчетах температура изменялась от 6000 К до 1000 К, плотность принимала значения от 0,05 кг/м³ до 0,40 кг/м³. В качестве термических уравнений состояния (УРС) применялись УРС идеального газа для газообразной смеси углеродных атомов и молекул, а для конденсированной фазы наноуглерода – УРС Грюнайтзена с учетом повышенного значения энтальпии образования нанографита $\Delta H^f = 4,8$ ккал/моль вследствие увеличения поверхностной энергии наночастиц размером около 5 нм [3, 4]. Расчеты конденсации углеродного газа и показали, что с ростом значений плотности возрастает температура начала образования конденсированной фазы T_{cp} (температура графитизации) $T_{cp} = 3510$ К – 3820 К и температура, при которой достигается полное превращение газообразного углерода в конденсированные наночастицы графита размером 5 нм $\Delta T_{полн.ср} = 2800$ К – 3000 К. Для изучения возможных структур, образующихся при конденсации нагретого до высокой температуры углеродного газа в процессе его быстрого охлаждения, проведены МД расчеты с использованием реакционно-силового поля ReaxFF в программном пакете LAMMPS. В расчете использовались следующие потенциалы: ReaxFF-CHO [5], ReaxFF-Ig [6], ReaxFF-c2013 [7] и ReaxFF-PAH [8]. Фуллереноподобные частицы углерода, образующиеся при конденсации нагретого до высокой температуры углеродного газа, являются центрами нуклеации, на которых в дальнейшем происходит рост крупных частиц сажи (графита) [9]. Сравнение расчетов МД показало, что только силовые поля ReaxFF-CHO, ReaxFF-c2013, ReaxFF-PAH дают возможность получить фуллереноподобные формы наноуглерода в конце расчета процесса конденсации углеродного газа.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания №07232020-0036).

Список литературы

1. Van Duin A. C. T., Dasgupta S., Lorant F., et. al. // J. Phys. Chem. A. 2001. V. 105 (41). P. 9396–9409.
2. Victorov S. B., Gubin S. A., Maklashova I. V., et.al. // Proceedings of the 32nd Int. Annual Conf. of ICT: Energetic Materials, Ignition, Combustion and Detonation. 2001. P. 69/1–69/15.
3. Викторов С.Б., Губин С.А., Маклашова И.В., Пелекин В.И. // Химическая физика. 2005. Т. 24 (12). С. 22 - 45.
4. Vieceilli J.A., Bastea S., Glosli J.N., Ree F.H. // J. Chem. Phys. 2001. V. 115 (6). P. 2730.
5. Chenoweth K., van Duin A. C. T., Goddard III W.A. // J. Phys. Chem. A. 2008. V. 112 (5). P. 1040–1053.
6. Liu L., Liu Y., Zybin S.V., Sun H., and Goddard III W.A. // J. Phys. Chem. A. 2011. V. 115. P. 11016-11022.
7. Srinivasan S.G., van Duin A. C. T., Ganesh P. // J. Phys. Chem. A. 2015. V. 119. P. 571 - 580.
8. Qian M., Yihua R., Luo K. H., van Duin A. C. T. // J. Chem. Phys. 2017. V. 147. P. 244305.
9. Остроумова Г. М. Моделирование процесса нуклеации углеродных наноструктур. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Долгопрудный. 2020.

С.А. ГУБИН¹, С.Х. ЗАЙНЕТДИНОВ², С.И. СУМСКОЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ Москва, Россия

²ЗАО Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, Москва, Россия

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ НЕДОСЖАТЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН

В работе рассматривается механизм появления недосжатой детонационной волны, при котором за фронтом лидирующей волной Чэпмена-Жуге происходит теплоотвод с изменением скорости звука. В результате образуется недосжатая детонационная волна, с параметрами меньше чем у детонации Чэпмена-Жуге с суммарным энерговыделением.

S.A. GUBIN¹, S.Kh. ZAINETDINOV², S.I. SUMSKOI¹

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

² ZAO STC PB, Moscow, Russian Federation

ON THE MECHANISM OF FORMATION OF UNDERPRESSURED DETONATION WAVES

The paper considers the results of gas-dynamic modeling of the flow behind the detonation wave with a change in the speed of sound. The parameters obtained in the calculation completely coincide with those predicted earlier in theoretical studies. The paper considers the mechanism of the appearance of an underpressured detonation wave, in which heat loss occurs behind the front of the leading Chapman-Jouguet wave with a change in the speed of sound. As a result, an underpressured detonation wave is formed, with parameters less than that of the Chapman-Jouguet detonation with a total energy release.

Структура детонационных волн обусловлена механизмами подвода тепла, которое обычно имеет место в зоне химических реакций за лидирующей ударной волной (УВ). Стандартный подход рассматривает ситуацию с однократным подводом энергии (энерговыделением). В этом случае формируется стационарная однофронтная детонация в режиме Чэпмена-Жуге (ЧЖ).

Теоретически можно рассмотреть двойное энерговыделение за фронтом лидирующей УВ, разнесенное во времени. В качестве примера такой ситуации можно рассматривать смесь «окислитель-газ/топливо-газ/топливо частицы» с быстрым энерговыделением при газовых реакциях и отсроченным энерговыделением при последующем догорании частиц. В этом случае возможно появление двух фронтовой детонации (с двумя плоскостями ЧЖ).

Детонационная волна с несколькими звуковыми плоскостями может образовываться и при отводе тепла с одновременным изменением скорости звука [1 – 4].

В данной работе в постановке, схожей с [1 – 4] рассматривается механизм появления недосжатой детонационной волны, при котором за фронтом лидирующей волной Чэпмена-Жуге происходит теплоотвод с изменением скорости звука. В результате образуется недосжатая детонационная волна, с параметрами меньше чем у детонации Чэпмена-Жуге для волны с суммарным энерговыделением. Как известно, в недосжатой детонационной волне должен существовать механизм, обеспечивающий («навязывающий») скорость недосжатой детонации. В рассмотренном механизме такую функцию выполняет лидирующая волна ЧЖ.

Таким образом показано, что обычно считающаяся чисто теоретической абстракцией недосжатая детонация может реализовываться в газодинамических течениях в виде комплекса «лидирующая детонация ЧЖ + состояние с параметрами слабой детонацией».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

Список литературы

1. Губин С.А., Сумской С.И. // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 7. С. 40-45.
2. Gubin S.A., Sumskoj S.I., Victorov S.B. // Physics Procedia . 2015. V. 72. С. 324.
3. Губин С.А., Сумской С.И. // V Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" ЛаПлаз-2019, сборник научных трудов. 2019. С. 331-332.
4. Губин С.А., Зайнетдинов С.Х., Сумской С.И.// VII Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" ЛаПлаз-2021, сборник научных трудов, 2021. С. 450-451.

С.И. СУМСКОЙ¹, С.Х. ЗАЙНЕТДИНОВ², М.В. ЛИСАНОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ И ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБАХ

В работе рассматривается течения в протяженных трубах при возникновении в них горения. Рассмотрены случаи зажигания от открытого конца, от закрытого торца, при наличии блокировок поперечного сечения. Исследованы параметры волн давления, в т.ч. при их выходе волн из трубопровода.

S.I. SUMSKOI, S.KH. ZAINETDINOV, M.V. LISANOV²

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

²ZAO STC PB, Moscow, Russia

PROPAGATION OF FLAMES AND PRESSURE WAVES IN LONG PIPES

The paper considers flows in extended pipes when combustion occurs in them. The cases of ignition from the open end, from the closed end, in the presence of cross-sectional blockages are considered. The parameters of pressure waves, incl. at their exit of waves from the pipeline.

Моделирование распространения пламени в протяженных трубах имеет важное значение, в том числе с точки зрения эксплуатации реальных трубопроводов, которые обладают определенной потенциальной опасностью [1 - 5]. Обычно опасность трубопроводных систем оценивается с точки зрения разрушения трубопровода, выхода транспортируемого продукта в окружающую среду с последующим горением и взрывом [6 - 10].

Однако существует и опасности развития процессов горения внутри трубопровода при их опорожнении.

В данной работе исследуются вопросы горения при различных вариантах развития горения. При зажигании от открытых участков трубопровода горение не создает в начальные моменты времени мощных волн давления от выхода волн в окружающую среду. Однако при наличии блокировок в трубопроводе, и это было показано в расчетах, в месте блокировок возникают циркуляции волн и пульсации давления, что может приводить к появлению детонационных волн. При инициировании горения внутри трубы из нее выходят мощные волны, способные наносить существенные поражения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

Список литературы

1. Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 3. С. 583.
- 2, Сумской С.И., Пчельников А.В., Шанина Е.Л., Лисанов М.В., Зозуля В.В. // Безопасность труда в промышленности. 2007. № 2. С. 48.
- 3, Дадонов Ю.А., Лисанов М.В., Гражданкин А.И., Печеркин А.С., Сидоров В.И., Дегтярев Д.В., Сумской С.И. // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 6. С. 2.
4. Лисанов М.В., Гражданкин А.И., Пчельников А.В., Савина А.В., Сумской С.И. // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 1. С. 34.
5. Пчельников А.В., Гражданкин А.И., Кручинина И.А., Сумской С.И., Дадонов Ю.А., Лисанов М.В. // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 6. С. 33.
6. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M. // В сб.: Physics Procedia. 2015. С. 347.
7. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M., Lisanov M.V., Egorov A.F. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 751. № 1. С. 012022.
8. Sumskoi S.I., Sofin A.S., Lisanov M.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 751. № 1. С. 012025.
9. Сумской С.И., Агапов А.А., Софьин А.С., Сверчков А.М., Егоров А.Ф. // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 9. С. 50.
- 10, Сумской С.И., Пчельников А.В., Лисанов М.В. // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 2. С. 48.

М. В. КАЗАЧЕНКО, И. О. ШАМШИН, В. С. АКСЁНОВ, С. М. ФРОЛОВ

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ ВОДОРОД–МЕТАН/ЭТИЛЕН/ПРОПАН ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

Проведены систематические экспериментальные исследования перехода горения в детонацию (ПГД) в топливно-воздушных смесях (ТВС) с двухкомпонентным горючим на основе водорода и алкана (CH_4 , C_3H_8) или алкена (C_2H_4). Объёмная доля x_{H_2} водорода в составе двухкомпонентного горючего изменялась от 0 до 1. Для оценки детонационной способности смесей использованы такие критерии как время и расстояние ПГД. Рассмотрены три конфигурации импульсной детонационной трубы (ИДТ). Экспериментальные зависимости времени и расстояния ПГД в зависимости от объёмной доли водорода x_{H_2} имеют нелинейный и – в отдельных случаях – немонотонный характер. Изменение конструкции ИДТ не привели к качественным изменениям полученных зависимостей: нелинейность сохраняется при различном устройстве секции ускорения пламени.

M. V. KAZACHENKO, I. O. SHAMSHIN, V. S. AKSENOV, S. M. FROLOV

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow

SPECIFIC FEATURES OF DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN STOICHIOMETRIC HYDROGEN-METHANE/ETHYLENE/PROPANE – AIR MIXTURES

Systematic experimental studies of deflagration-to-detonation transition (DDT) in fuel-air mixtures (FAM) with a binary fuel based on hydrogen and alkane (CH_4 , C_3H_8) or alkene (C_2H_4) are performed. The volume fraction x_{H_2} of hydrogen in the composition of binary fuel is varied from 0 to 1. Various configurations of a pulsed detonation tube (PDT) are considered. To assess the detonability, the criteria based on DDT run-up time and distance are used. The experimental dependences of the DDT run-up time and distance on x_{H_2} are found to be nonlinear and, in some cases, nonmonotonic in nature. Changes in the design of the PDT did not lead to qualitative changes in the obtained dependences: at different arrangements of the flame acceleration section, the nonlinearity is preserved.

В качестве критерия определения детонационной способности использованы время и расстояние перехода горения в детонацию (ПГД) [1]. Рассмотрены стехиометрические воздушные смеси двухкомпонентного горючего: метановодородные, пропановодородные и этиленоводородные смеси с объёмной долей водорода x_{H_2} от 0 до 1. Для определения влияния геометрических особенностей используемой импульсной детонационной трубы (ИДТ), изучены особенности ПГД для всех смесей при трёх различных конфигурациях ИДТ, отличающихся конструкцией секции ускорения пламени: положением спирали Щёлкина и длиной секции. Схемы конструкций ИДТ представлены на рисунке 1.

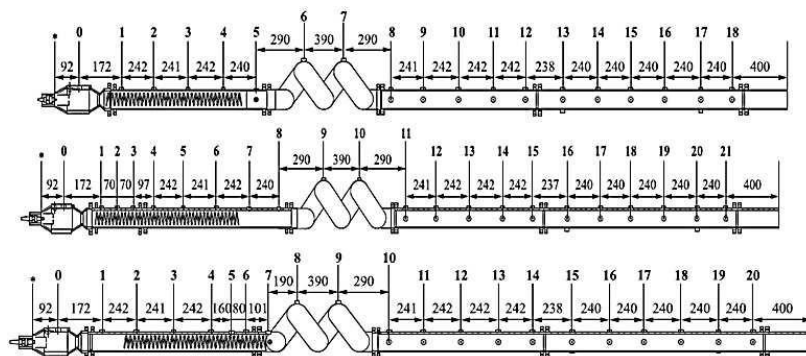


Рисунок 1. Конфигурации 1 (а), 2 (б) и 3 (в) импульсной детонационной трубы.

В результате проведённых испытаний получены экспериментальные зависимости времени и расстояния ПГД от объёмной доли водорода в двухкомпонентном горючем. Показано, что для метановодородных ТВС при содержании водорода в горючем $0.25 < x_{\text{H}_2} < 0.65$ кривые расстояния и времени ПГД имеют локальный максимум. Для этиленоводородных и пропановодородных смесей детонационная способность воздушных смесей значительно повышается при $x_{\text{H}_2} > 0.7$, а при меньшем содержании водорода время и расстояние ПГД изменяются медленнее или вовсе не изменяются в зависимости от конфигурации ИДТ. Увеличение доли водорода в смеси горючего приводит к разнонаправленным эффектам: задержка самовоспламенения уменьшается с увеличением температуры и давления; скорость звука увеличивается и, как следствие, снижается число Маха ударной волны и температура за ней. Поскольку изменения в конструкции секции ускорения пламени ИДТ не приводят к качественным изменениям полученных экспериментальных зависимостей, можно утверждать, что они вызваны не особенностями конструкции ИДТ, а физико-химическими свойствами водорода.

Список литературы

1. Фролов С. М. и др. // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 3. С. 78–90. DOI: 10.30826/CE19120309.

Д.С. КОЛЕСНИКОВ¹, А.В. СКОБЛЯКОВ¹, А.В. БОГДАНОВ¹, А.В. КАНЦЫРЕВ¹, А.А. ГОЛУБЕВ¹, Н.С. ШИЛКИН²,
В.Б. МИНЦЕВ²

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва, Россия

²Институт Проблем Химической Физики РАН, Черноголовка, Россия

МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПРОФИЛЯ И ПОЗИЦИИ ПУЧКА ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРОТОННО-РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Разработана методика коррекции неустойчивости поперечного профиля и позиции пучка при обработке изображений, полученных методом протонной радиографии. В данной методике используется дополнительный тонкий сцинтиллятор, установленный прямо перед исследуемым объектом, и математическое преобразование, связывающее изображения в обеих плоскостях регистрации. Методика апробирована на результатах Монте-Карло моделирования с использованием полномасштабной виртуальной модели протонного микроскопа ПУМА.

D.S. KOLESNIKOV¹, A.V. SKOBLIAKOV¹, A.V. BOGDANOV¹, A.V. KANTSYREV¹, A.A. GOLUBEV¹,
N.S. SHILKIN², V.B. MINTSEV²

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

²Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia

METHOD FOR CORRECTION OF BEAM PROFILE AND POSITION INSTABILITY DURING PROCESSING OF PROTON RADIOGRAPHY IMAGES

Method for correction of beam profile and position instability during processing of images obtained by proton radiography technique is developed. The method utilizes additional thin scintillator placed right before investigated object and mathematical transformation that links images on both recording planes. Approbation of this method performed using results of Monte-Carlo simulation with the use of full-scale virtual model of PUMA proton microscope.

Радиография с использованием высокоэнергетических пучков протонов [1] является мощным диагностическим методом для измерения плотности и исследования внутренней структуры плотных объектов. Метод предоставляет уникальный набор характеристик: высокая проникающая способность, высокие пространственное и временное разрешение, высокий контраст по плотности и возможность наблюдать эволюцию динамических объектов.

Результатом протонно-радиографического исследования является двухмерное изображение исследуемого объекта, выраженное в единицах интенсивности пучка. Трансмиссия протонного пучка через исследуемый объект является функцией его массовой толщины [1]. Деление изображения исследуемого объекта на изображение пучка в отсутствие объекта позволяет получить изображение в единицах трансмиссии. Неустойчивость поперечного профиля и позиции пучка от выстрела к выстрелу приводит к ошибкам в результирующих значениях трансмиссии пучка, следовательно, плотности исследуемого объекта.

Очевидный способ решения данной проблемы – усреднение массива из нескольких изображений пучка – дает приемлемый результат лишь при незначительном изменении профиля и позиции пучка. Более продвинутые подходы состоят в использовании дополнительной плоскости регистрации изображения пучка [2], расположенной перед исследуемым объектом, или аппроксимации профиля пучка в протонно-радиографическом изображении объекта [3].

В данной работе предложена методика, основанная на установке дополнительного тонкого сцинтиллятора непосредственно перед исследуемым объектом, что позволит регистрировать изображения пучка и объекта в одном выстреле. Методика включает алгоритм поиска математического преобразования, связывающего изображения в обеих плоскостях регистрации и учитывает: различие в геометрии изображений, аппаратную функцию ионной оптики сечения формирования изображения протонного микроскопа, изменение интенсивности изображений при удалении центра пучка от оси тракта установки.

Апробация методики выполнена с использованием результатов Монте-Карло моделирования протонного микроскопа ПУМА [4]. При получении расчетных протонно-радиографических изображений использовалась полномасштабная модель [5] установки ПУМА, заданная в среде моделирования Geant4, с добавлением сцинтиллятора, устанавливаемого перед исследуемым объектом. Для имитации неустойчивости пучка в модели проведена вариация формы и интенсивности его поперечного сечения, а также вариация сдвига относительно оси тракта установки. Проведено сравнение исходного и восстановленного изображений пучка: среднеквадратичная ошибка $\sigma = 1 \div 3$ %. Для использованной ранее стандартной методики усреднения массива изображений пучка ошибка составляла $\sigma = 7 \div 22$ %.

Список литературы

1. Morris C.L., King N.S.P., Kwiatkowski K., Mariam F.G., Merril F.E., Saunders A. // Rep. Prog. Phys. 2013. V.76. №4. P.26.
2. Schultz L.J., Kwiatkowski K.K., Morris C.L., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V.508. №3. P.220.
3. Kolesnikov D.S., Kantsyrev A.V., Golubev A.A. // Phys. At. Nucl. 2019. V82. №12. P.1690.
4. Kantsyrev A.V., et al. // Instrum. Exp. Tech. 2014. V. 57. P. 1–10.
5. Kantsyrev A.V., Skoblyakov A.V., Bogdanov A.V., Golubev A.A., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V.946. P.012019.

Г.В. КОЛОМИЙЦЕВ^{1,2}, А.П. ЧУГАЙНОВА², В.А. ШАРГАТОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Математический Институт Российской академии наук им. В.А. Стеклова, Москва, Россия

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА-БЮРГЕРСА В ВИДЕ БЕГУЩИХ ВОЛН С МОНОТОННОЙ СТРУКТУРОЙ

Для обобщенного уравнения Кортевега – де Вриза – Бюргерса с функцией потока, имеющей две точки перегиба, описывающего распространение бегущих волн в диссипативно-диспергирующей среде с коэффициентом диссипации, зависящим от координат бегущей волны, построен пример монотонных структур неклассических разрывов, демонстрирующий возможность их неустойчивости. Проведен анализ их линейной устойчивости методом функций Эванса, а также проведен анализ нелинейной эволюции таких структур. Для задачи с переменным коэффициентом диссипации сформулирован подход к построению асимптотических выражений для функции Эванса для больших значений спектрального параметра.

G.V. KOLOMIYTSEV^{1,2}, A.P. CHUGAINOVA², V.A. SHARGATOV^{1,2}

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

² Steklov Mathematical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

INSTABILITY OF MONOTONIC TRAVELING WAVE SOLUTIONS OF GENERALIZED KORTEVEG-DE VRIES-BURGERS EQUATION

For the generalized Korteweg-de Vries-Burgers equation with non-convex flow function having two inflection points, which describes the propagation of traveling waves in a dissipative-dispersive medium with a dissipation coefficient depending on the coordinates of the traveling wave, an example of monotonic structures of non-classical discontinuities is constructed, demonstrating the possibility of their instability. An analysis of their linear stability by the Evans function method is carried out, and an analysis of the nonlinear evolution of such structures is also carried out. For a variable dissipation coefficient, an approach is a problem formulated for constructing asymptotic expressions for the Evans function for large values of the spectral parameter.

Обобщенное уравнение Кортевега-де Вриза-Бюргерса (КдВБ) возникает в задачах о распространении нелинейных волн в сплошных средах, обладающих диссипативно-диспергирующими свойствами, в том числе в ситуациях, когда параметры среды изменяются в некоторой области конечной ширины. В случае, когда функция потока этого уравнения обладает несколькими точками перегиба, возникают решения в виде бегущих волн, обладающие монотонной структурой. Такие решения в пределе «идеальной» среды соответствуют неклассическим (особым) разрывам, скорость распространения которых превышает характеристическую [1, 2]. В ситуации, когда коэффициент диссипации среды зависит от координат бегущей волны, возможно существование нескольких решений в виде особых разрывов с монотонной структурой, распространяющихся с одной и той же скоростью [3].

Исследование линейной устойчивости таких решений с помощью функции Эванса [4] показывает, что решения в виде монотонных особых разрывов, соответствующих одной и той же скорости, могут обладать различной устойчивостью. В частности, решение, центрированное в области наибольшего значения параметра диссипации, оказывается линейно неустойчивым.

Рассмотрение эволюции решений в виде бегущих волн осуществляется посредством решения нестационарной задачи для уравнения КдВБ. В рассмотренном случае неустойчивое решение с монотонным профилем эволюционирует так, что его профиль асимптотически приближается к профилю одного из устойчивых решений того же типа, соответствующего той же скорости.

Применение описанного выше подхода, основанного на функции Эванса, для задачи с переменным коэффициентом диссипации, требует отдельного формального обоснования. Одно из требований, предъявляемых к этой функции – ограниченность при больших значениях спектрального параметра. В работе был предложен универсальный подход, позволяющий найти асимптотическое выражение для функции Эванса в указанном пределе. Такое выражение, во-первых, позволяет выявить условия применимости метода, и, во-вторых, может быть применено для уменьшения объема производимых расчетов.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант №20-11-20141.

Список литературы

1. Kulikovskii A.G., Chugainova A.P. // *Comp. Math. Math. Phys.* 2004. V. 44. № 6. P. 1062.
2. El G.A., Hofer M.A., Shearer M. // *SIAM Review.* 2017. V. 59. № 1. P. 3.
3. A.P. Chugainova and V.A. Shargatov // *EPJ Plus.* 2020. V. 135. № 8. P. 1.
4. Pego R.L., Weinstein M.J. // *Phys. Let. A.* 1992. V. 162. № 3. P. 263.

С.А. ГУБИН¹, А.В. КУДИНОВ¹, И.В. МАКЛАШОВА¹, М.Ш. КУРБАНОВ², У.М. НУРАЛИЕВ²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫКАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

На основе термодинамических расчетов зависимостей выхода жидкого кремния от количества метана определен диапазон массового содержания диоксида кремния, в котором целесообразна замена части твердого углерода метаном. МД расчеты позволили установить последовательность промежуточных углеродных наноструктур образующихся при формировании центров нуклеации нанодисперсного углерода.

S.A. GUBIN¹, A.V. KUDINOV¹, I.V. MAKLASHOVA¹, M.S. KURBANOV², U.M. NURALIEV²

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

²Arifov institute of ion-plasma and laser technologies of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan

THERMODYNAMIC CALCULATION AND MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF CARBOTHERMIC REDUCTION OF SILICON USING METHANE

Based on thermodynamic calculations of the liquid silicon yield dependences on the amount of methane, the range of the mass content of silicon dioxide was determined. In this range it is advisable to replace part of the solid carbon with methane. MD calculations made it possible to establish the sequence of intermediate carbon nanostructures formed during the formation of nanodispersed carbon centers of nucleation.

Рассматривался процесс восстановления кремния из однородной смеси конденсированных – кварца SiO₂, углерода C/s/ и газообразного метана CH₄/g/ в печи при температуре от 2000 К до 6000 К и атмосферном давлении.

Условия максимального выхода кремния определялись путем решения ТР-задачи равновесной термодинамики с использованием равновесного термодинамического расчета в программном коде TDS [1] с применением базы данных термодинамических свойств индивидуальных веществ ИВТАНТЕРМО [2]. Уравнение состояния конденсированных веществ (SiO₂, SiO, C) – V = const. Уравнение состояния газа – идеальный газ.

На основе анализа результатов равновесных термодинамических расчетов определен диапазон значений массового содержания твердого диоксида кремния для получения высоких значений массовых долей жидкого кремния при пиролизе смеси конденсированного углерода и газообразного метана. Расчетные значения этого диапазона массового содержания твердого SiO₂ согласуются с экспериментальными данными [3].

При получении кремния образуется газообразный SiO, улет которого из печи с отходящими газами приводит к значительной потере кремния. Применение метана в процессе пиролиза может повысить выход кремния благодаря дополнительному восстановлению Si высококачественным наноуглеродом. Рассчитаны зависимости выхода жидкого кремния от массового содержания метана. Показано, что замена части твердого углерода метаном целесообразна только в диапазоне 69 % m – 73 % m SiO₂(s). При уменьшении или увеличении количества SiO₂(s) в реагентах выход жидкого кремния снижается.

Из термодинамических расчетов следует, что при термическом разложении метана образуется до 30 % m конденсированного наноуглерода в виде наночастиц разного размера и формы. Такой нанодисперсный углерод марки Carbon Black Nanoparticles получают в промышленных масштабах - миллионы тонн в год [4].

Для изучения закономерностей образования нанодисперсных частиц углерода в продуктах термического разложения метана выполнено МД моделирование этого процесса при постоянных значениях температуры и плотности. МД расчеты с применением реакционно-силового поля ReaxFF при температурах 2500 К – 6000 К показали, что разложение метана состоит в последовательной замене образования радикалов и легких углеводородов все более сложными многоатомными углеводородами с ароматическими кольцами. МД расчеты позволили визуализировать последовательность промежуточных нанодисперсных структур при формировании наночастиц в ходе соединения отдельных атомов углерода в нити, свертывание их в кольца, соединение в крупные многокольцевые структуры подобные полициклическим ароматическим углеводородам (ПАУ), распады и объединения которых ведут к образованию центров нуклеации конденсированного углерода в виде наноуглеродных частиц с луковичной многослойной структурой графенов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания №07232020-0036).

Литература

1. Victorov S.B., Gubin S.A., Maklashova I.V., Revyakin I.I. 2001. Thermodynamic TDS code: Application to detonation properties of condensed explosives. Energetic Materials, Ignition, Combustion and Detonation. 32nd Int. Annual Conf. of ICT. Karlsruhe, Germany. P. 69/1 – 69/15.
2. Гурвич Л.В., Вейнц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. изд. в 4-х т. / 3-е изд., перераб. и расшир. – М.: Наука, 1978-1982.
3. Abdurakhmanov V.M., Ashurov N.B., Kurbanov M.Sh., Nuraliev U.M. // Applied Solar Energy. 2014, V. 50(4). P. 282-286.
4. M.Gautier, V. Rohani et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. V. 42(47). P. 28140-28156.

В.Ф. ЛОМАДУРОВ, Т.В. ГУБИНА¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МОДИФИЦИРОВАННОМ НИТРАТЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Проведен анализ результатов рентгенографических исследований модифицированного молекулами тринитрата глицерина нитрата целлюлозы (N=12,0%). Показано, что при массовой доли тринитрата глицерина около 30% в модифицированном нитрате целлюлозы происходят структурные превращения.

V.F. LOMADUROV, T.V. GUBINA¹

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

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN MODIFIED CELLULOSE NITRATE

The analysis of the results of X-ray studies of cellulose nitrate modified with glycerol trinitrate molecules (N=12.0%) was carried out. It is shown that at a mass fraction of glycerol trinitrate of about 30%, structural transformations occur in modified cellulose nitrate.

Изучение характеристик полимерных композиций, в состав которых в качестве компонента входит тринитрат глицерина (NG), продолжает представлять научный интерес [1].

Методом широкоугольной рентгеновской дифрактометрии исследовались образцы нитрата целлюлозы (НЦ), модифицированного NG в водной среде. В исходном (до модификации) образце НЦ массовая доля азота составляла 12,0%. Рентгенографические исследования НЦ проводились на отечественном дифрактометре ДРОН-2,0 при схемесъемки дифрактограммы на отражение с использованием излучения $\text{Co K}\alpha$, монохроматизированного железным фильтром в сканирующем режиме в диапазоне углов дифракции 2θ от $13,2^\circ$ до 69° . Определение параметров интерференционных линий НЦ проводилось при помощи компьютерных программ [2].

Структурные изменения в областях когерентного рассеяния (ОКР) НЦ, регистрируемые рентгенографическим методом, определяли по изменению значений параметров отдельно стоящей сильной интерференционной линии 110 НЦ [3].

Изменения межплоскостного расстояния в кристаллографическом направлении $\langle 110 \rangle$ в интервале концентраций NG в модифицированном НЦ 25%- 30% (рис. 1) указывает на то, что в данном интервале концентраций NG происходят структурные превращения в ОКР НЦ.

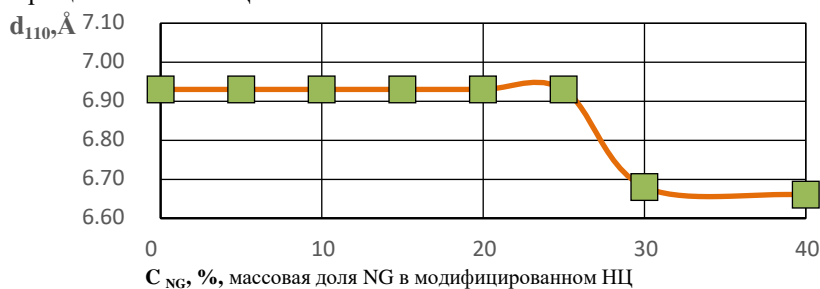


Рис. 1. Концентрационная зависимость межплоскостного расстояния d_{110} в кристаллографическом направлении (110) для модифицированного НЦ

Представленные на рис. 1 изменение структурных параметров ОКР НЦ, не могут быть отнесены к наблюдаемым ранее структурным превращениям в ОКР НЦ [3], таким как образование молекулярных комплексов НЦ с низкомолекулярными соединениями, образование твердых растворов, до кристаллизация ОКР НЦ.

Показано, что в образцах НЦ, модифицированного в NG водной среде, происходят структурные превращения в ОКР НЦ. Это происходит при массовой доле NG около 30% и проявляется как появление сегментальной подвижности макромолекул НЦ, которое указывает на переход (превращение) жесткоцепных макромолекул НЦ в гибкоцепные макромолекулы. Превращение жесткоцепных макромолекул высокомолекулярного соединения в гибкоцепные макромолекулы имеет характер фазового перехода первого рода [2].

Список литературы

1. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М., Малинин С.А., Воропаев И.Д. // Физика горения и взрыва. 2017. Т.53. № 1. С.57-63.
2. Ломадуров В. Ф., Воронков А.Ф., Смирнов В.С., Капмыков Ю.Б., Губина Т.В // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2021, том 10, №3, с.207-215
3. Свиридов А.Ф., Цванкин Д.Я., Перцин А.И. // Высокомолекулярные соединения. 1984. Том (А) XXVI. № 7. С1553-1556.

С.П. МЕДВЕДЕВ, О.Г. МАКСИМОВА, Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.М. ТЕРЕЗА, С.В. ХОМИК

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ СЛОЕ СМЕСИ ВОДОРОД - ВОЗДУХ

С помощью численного моделирования выявлены критические параметры распространения детонационной волны в полуограниченном слое смеси водород – воздух, образованном в припотолочном пространстве при аварийном выбросе водорода. Рассмотрена возможность ослабления действия взрыва за счет создания промежуточного инертного газового слоя, отделяющего горючую смесь от защищаемой поверхности.

S.P. MEDVEDEV, O.G. MAXIMOVA, T.T. CHEREPANOVA, G.L. AGAFONOV, E.K. ANDERZHANOV, A.M. TEREZA, S.V. KHOMIK

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences Moscow, Russia

SIMULATION OF EXPLOSION IN A SEMI-CONFINED LAYER OF HYDROGEN - AIR MIXTURE

Using numerical simulation, the critical conditions of detonation wave propagation in a semi-confined layer of a hydrogen-air mixture formed in the under-ceiling space during an accidental hydrogen release were revealed. It was demonstrated a possibility of the explosion mitigation by creating an intermediate inert gas layer separating the combustible mixture from the protected surface.

Для оценки последствий потенциальной аварийной ситуации на объектах ядерной и водородной энергетики выполнено численное моделирование развития детонационной волны в слое горючей газовой смеси с одной стороны ограниченной стенкой (потолком), а с другой объемом, заполненным инертным газом (обычно воздухом). Расчеты проведены с помощью пакета Gas Dynamics Tool в двухмерной постановке для модельного газа с параметрами, соответствующими стехиометрической смеси водород – воздух. Выполнен анализ эволюции ячеистой структуры детонационной волны в процессе распространения по полуограниченному слою горючей смеси различной толщины. Показано, что существует критическая толщина горючего слоя, при которой еще возможно реиницирование детонационной волны после ее распада. Характерные особенности процесса проиллюстрированы на рис.1, где приведены результаты расчета для случая переменной толщины слоя при скоплении водорода в объеме, ограниченном куполообразным потолком. Для оценки действующей на купол динамической нагрузки на рис.1 в дополнение к траекториям тройных точек, приведены профили давления через каждые 0.12 м. Кроме того, рядом с кривыми давления указана скорость распространения ударно-волнового фронта. На расстоянии около 1.7 м от начала расчетной области высота горючего слоя достигает критической величины 50 мм, в результате чего детонационная волна распадается.

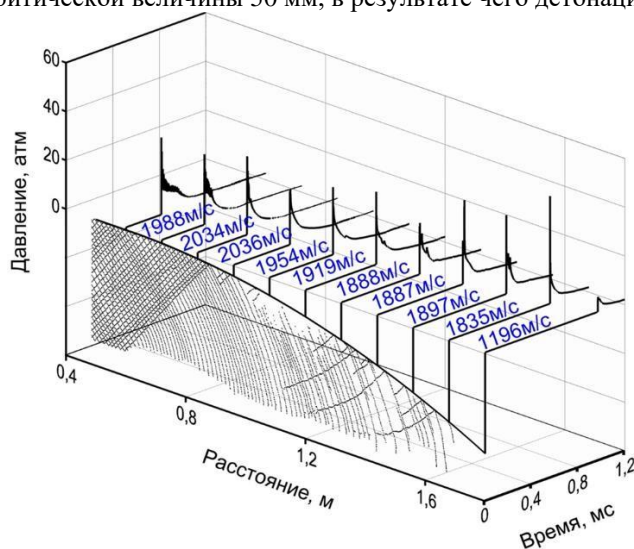


Рис. 1. Распространение и распад детонационной волны в пространстве под куполом

Рассмотрена задача ослабления динамической нагрузки за счет создания промежуточного инертного газового слоя, отделяющего горючую смесь от защищаемой поверхности. Показано, что детонационная волна эффективно разрушается при толщине инертного слоя порядка размера детонационной ячейки.

РЕАКЦИЯ ВВ НА НИЗКОСКОРОСТНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ

По литературным данным кратко обобщены проблемы и способы изучения взрывчатых превращений в ВВ при низкоскоростном механическом воздействии. Рассмотрены некоторые аспекты инициирования взрывчатого превращения при нагружении стальным цилиндрическим ударником при скоростях удара до 100 м/с.

V.A. PUSHKOV, Y.V. BATKOV

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

RESPONSE OF HE TO LOW-VELOCITY MECHANICAL LOADING

The paper gives a brief summary of investigating explosive transformations in HE under low-velocity mechanical impact. Some aspects of initiation of explosive transformation under loading by steel cylindrical impactor at velocities before 100 m/s are considered.

Исследование взрывчатых превращений (ВП) в ВВ при низкоскоростном механическом воздействии ($V_{уд}=10-100$ м/с) отвечает многим практическим случаям (нагрузки технологические, транспортные, аварийные, при диверсиях и др.). Из-за сложности процесса ВП на сегодня нет полных данных об условиях его инициирования. Не существует и достаточно подтвержденных моделей физических процессов, приводящих к инициированию ВП. Исследования ВП при низкоскоростном механическом воздействии активно проводятся в разных лабораториях мира, например, в России [1-3] и США [4-5]. Опыты проводятся при воздействии на ВВ пули, сферического осколка, плоских ударников, цилиндрического ударника, стржня Гопкинсона. Так, в работе [2] приведены результаты изучения реакции ВВ на основе октогена на низкоскоростное механическое воздействие стального ударника при скоростях 55-75 м/с. Для регистрации параметров нагружения, приводящих к ВП, применялся радиointерферометр (РИ). РИ представляет собой приемо-передающее устройство миллиметрового диапазона длин волн. В опытах с помощью РИ определялась скорость ударника от начала его движения до внедрения в ВВ. Регистрировалось также начало разлета ВВ на фрагменты или (в случае ВП) движение продуктов взрыва. ВП происходило при $V_{уд}>60$ м/с [2]. Испытывались полусферические образцы (наружный диаметр ~100 мм, стенка ~20 мм), стальной ударник $\varnothing 52 \times 175$ мм ударял по наружному полюсу образца. Полет ударника и его внедрение в образец регистрировались с помощью РИ со стороны внутреннего полюса. На рис. 1 в координатах скорость объекта-время приведены данные опыта при $V_{уд}=75$ м/с [2].

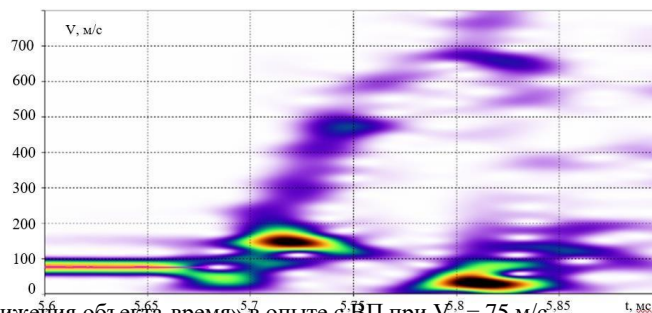


Рис. 1. Диаграмма «скорость движения объекта-время» в опыте ВП при $V_{уд} = 75$ м/с

На рис. 1 первым объектом является ударник, скорость которого после удара немного снизилась. Вторым объектом являются продукты взрыва, которые за ~0,1 мс приобретают скорость ~700 м/с. К началу ВП ударник внедрился в полусферу ВВ на 1,5 мм. По серии опытов выявлены и другие особенности инициирования или отсутствия ВП [2]. Данные, получаемые с помощью РИ полезны для разработки моделей инициирования ВП, а также критериев безопасности.

Список литературы

1. Абакумов А.И., Большаков А.П., Васенин С.Н., Гушанов А.Р., Сеницын В.А. // Труды IX Харитоновских Чтений. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров. Россия. 2007. С. 215-226.
2. Pushkov V.A., Abakumov A.I., Yurlov A.V., Kal'manov A.V., Sedov A.A., Rodionov A.V. // AIP Conference Proceedings. **1426**, Part 1. 2012. P. 418-421.
3. Кобылкин И.Ф., Павлова И.А. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 3. С. 54–65.
4. Chidester S.K., Thompson D.G., Vandersall K.S., Idar D.J., Tarver C.M., Garcia F., Urtiew P.A. // AIP Conference Proceedings. **955**. 2007. 903.
5. Garcia F., Vandersall K.S., Tarver C.M. // 18th APS-SCCM and 24th AIRAPT IOP. Journal of Physics: Conference Series. **500**. 2014. 052048.

Т.А. РОСТИЛОВ¹, В.С. ЗИБОРОВ¹, А.Ю. ДОЛГОБОРОДОВ^{1,2}, М.Л. КУСКОВ²

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

ЭВОЛЮЦИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В НАНОПОРИСТОМ НИКЕЛЕ

Эволюция фронта ударной волны в нанопористом никеле была исследована в экспериментах по одноосному ударному нагружению с применением метода лазерной интерферометрии VISAR. Рассмотрено влияние волны-предвестника на наблюдаемую в экспериментах структуру фронта ударной волны в зависимости от давления нагружения и толщины образца.

T.A. ROSTILOV¹, V.S. ZIBOROV¹, A.Yu. DOLGOBORODOV^{1,2}, M.L. KUSKOV²

¹Joint Institute for High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

²N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, RAS, Moscow, Russia

EVOLUTION OF ELASTIC-PLASTIC SHOCK WAVE IN NANOPOROUS NICKEL

Evolution of shock wave front in nanoporous nickel is investigated in uniaxial impact loading experiments using the VISAR laser interferometer method. The influence of the precursor wave on the shockwave front structure observed in experiments is studied depending on the loading pressure and sample thickness.

Исследовано ударно-волновое нагружение пористого наноразмерного никеля (pnNi). Образцы изготавливались прессованием порошка наночастиц со средним размером 50 нм. Средняя плотность образцов – 4.58 г/см³, пористость – около 50%. Исследование подобных материалов с нанопорами способно показать как уникальные особенности их ударной сжимаемости, так и в целом продемонстрировать схожесть или различие в отклике нано- и микропористых сред на ударную нагрузку. Отдельный интерес в изучении pnNi связан с тем, что этот материал является компонентом в реакционноспособных смесях с наночастицами алюминия, которые исследуются на предмет образования интерметаллида NiAl за фронтом ударной волны [1].

В экспериментах дискообразный образец pnNi нагружался в результате соударения с ним плоского дюралевого или медного ударника со скоростями 200-850 м/с. Рис. 1 демонстрирует, как изменяется скорость тыльной поверхности образца после выхода на неё ударной волны; в экспериментах к этой поверхности примыкало водяное диагностическое окно. Регистрация изменения скорости проводилась с помощью интерферометрического метода VISAR [2].

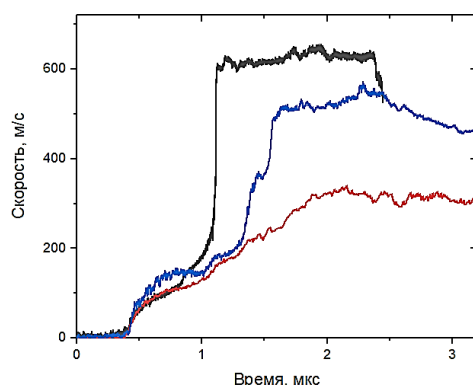


Рис. 1. Профили ударных волн (профили скорости) в нанопористом никеле на контактной границе с водяным окном при 1.7 - 4.1 ГПа и толщинах образцов около 2 мм.

Ступенчатая структура фронта упруго-пластической волны показывает, что в исследованном диапазоне давлений ударная волна, входящая в образец, расщепляется на волну-предвестник (первоначальный скачок скорости при ~0.4 мкс на рис. 1) и последующую за ней пластическую ударную волну. Картина осложнена тем, что во время эксперимента внутри образца распространяются переотражения предвестника [3], которые приводят к слабым скачкам скорости после первоначального выхода предвестника и до выхода пластической ударной волны. В итоге ударное нагружение pnNi при относительно малых давлениях является сложным ступенчатым процессом. В работе показано влияние давления нагружения, толщины образца и материала диагностического окна на наблюдаемую волновую картину.

Список литературы

1. Якушев В.В., Ананьев С.Ю., Уткин А.В., Жуков А.Н., Долгобородов А.Ю. // ФГВ. 2018. Т. 54. № 5. С. 45.
2. Barker L.M., Hollenbach R.E. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 4669.
3. Linde R.K., Seaman L., Schmidt D.N. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. № 8. P. 3367

И.А. САДЬКОВ, А.С. СИЛАНТЬЕВ, В.А. СМЕТАНЮК, С.М. ФРОЛОВ

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

ГАЗОВАЯ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННАЯ ШТАМПОВКА

Продолжены начатые ранее исследования инновационной технологии – газовой импульсно-детонационной штамповки корпусных деталей. Отличительные черты технологии – отсутствие пуансона (ответной части профилированной матрицы) и комбинированное газодинамическое и тепловое воздействие на заготовку. Проведены эксперименты по штамповке деталей сложной формы из листовых заготовок хрупкого жаропрочного сплава. В экспериментах варьировали температуру заготовок, а также частоту и интенсивность газодинамического (ударно-волнового) воздействия.

I.A. SADYKOV, A.S. SILANTIEV, V.A. SMETANYUK,
S.M. FROLOV

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

GAS PULSE-DETONATION STAMPING

This work continues the earlier reported investigations of the innovative technology – gaseous pulsed detonation stamping of various casing parts. Distinctive features of the technology are the absence of a punch (the mating part of a profiled matrix) and the combined gas-dynamic and thermal effects on the workpiece. Experiments were carried out on stamping complex-shaped parts from sheet blanks of a brittle heat-resistant alloy. In the experiments, the temperature of the blanks was varied, as well as the frequency and intensity of the gas-dynamic (shock wave) action.

В [1, 2] нами предложена инновационная технология импульсно-детонационной штамповки корпусных деталей, заключающаяся в периодическом воздействии на заготовку детонационными волнами (ДВ) и горячими продуктами газовой детонации. По сравнению с детонацией конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) применение газовой детонации при штамповке взрывом допускает многократное периодическое газодинамическое и тепловое воздействие на обрабатываемую заготовку и упрощает выполнение требований технического надзора. Благодаря комбинированному газодинамическому и тепловому воздействию газовой детонации на заготовку новая технология позволяет штамповать заготовки из хрупких жаропрочных сплавов без применения дорогостоящих технологий горячей штамповки.

Создана лабораторная установка для газовой импульсно-детонационной штамповки. Установка представляет собой толстостенный расширяющийся плоский вертикальный канал объемом 30 л, в нижней узкой части которого расположена форкамера со смесительным устройством и свечами зажигания, а в верхней широкой части – плоский фланец с профилированной матрицей и креплением для заготовки. Установка допускает подогрев заготовки и матрицы газовыми горелками и работает следующим образом: (1) через форкамеру канал заполняется стехиометрической метано-кислородной смесью, (2) смесь зажигается маломощным электрическим разрядом, и происходит переход горения в детонацию, а затем (3) сформированная детонационная волна, распространяясь по каналу, отражается от нагретой заготовки из листового материала, оказывая на неё механическое и тепловое воздействие. Изменяя степень заполнения канала горючей смесью и частоту циклов, можно варьировать интенсивность воздействия на заготовку, а также температуру заготовки и матрицы. Скважность импульсов изменялась от 10 до 30 с.

Эксперименты показали, что разработанная технология газовой импульсно-детонационной штамповки позволяет штамповать корпусные детали сложной формы даже из очень хрупких жаропрочных сплавов. На рисунке 1 представлена фотография полученной корпусной детали.

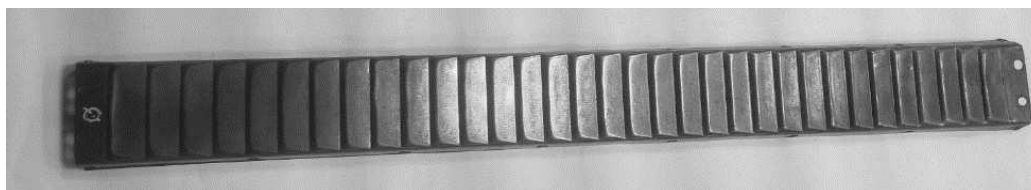


Рисунок 1: Фотография корпусной детали

Список литературы

1. Фролов С.М., Сметанюк В.А., Фролов Ф.С. Способ детонационной штамповки и устройство для его реализации. Заявка РСТ от 2014 г.; Methods of detonation stamping and device for its realization. Frolov S.M., Frolov F.S., Smetanyuk V.A. RCT patent application RCT/RU2014/000780 of 16.10.2014, priority date 16.10.2014
2. Сметанюк В. А., Садьков И. А., Силантьев А. С., Фролов С. М. // VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021: Сборник научных трудов. Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2021, с. 430-431

Т.А. СЕМЕНОВ^{1,2}, Р.В. ВОЛКОВ¹, М.С. ДЖИДЖОЕВ¹, К.А. ИВАНОВ^{1,3}, А.В. ЛАЗАРЕВ¹, Е.И. МАРЕЕВ^{1,2}, Н.В. МИНАЕВ², И.Н. ЦЫМБАЛОВ¹, Д.Н. ТРУБНИКОВ¹,
А.Б. САВЕЛЬЕВ^{1,3}, В.М. ГОРДИЕНКО¹

¹ Физический и Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Троицк, Россия

³ Физический институт им. Лебедева РАН, Москва, Россия

НЕЙТРОНЫ И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ СУБМИКРОННЫХ АГРЕГАТОВ В СТРУЕ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ СМЕСИ CO₂+CD₃OD

Предложен новый режим фемтосекундной лазерной генерации нейтронов и рентгеновского излучения при взаимодействии лазерного излучения релятивистской интенсивности (3×10^{18} Вт/см²) с субмикронными агрегатами, образующимися при быстром расширении в вакуум исходной сверхкритической смеси CO₂+CD₃OD. В результате создан источник нейтронов (2.45 МэВ) с пиковой эффективностью 6×10^4 н/Дж и тормозного рентгеновского излучения в диапазоне 3-100 кэВ.

T.A. SEMENOV^{1,2}, R.V. VOLKOV¹, M.S. DZHIDZHOEV¹, K.A. IVANOV^{1,3}, A.V. LAZAREV¹,
E.I. MAREEV^{1,2}, N.V. MINAEV², I.N. TSYMBALOV¹, D.N. TRUBNIKOV¹,
A.B. SAVEL'EV^{1,3}, V.M. GORDIENKO¹

¹ Physical and Chemical faculties of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Institute of Photon Technologies of FSRC "Crystallography and Photonics", RAS, Troitsk, Russia

³ Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia

NEUTRONS AND X-RAY FROM FEMTOSECOND LASER PLASMA OF SUBMICRON AGGREGATES IN EXPANDING JET OF SUPERCRITICAL CO₂+CD₃OD MIXTURE

A new approach is proposed for femtosecond laser neutron and x-ray generation under interaction of relativistic intensity ($\sim 10^{18}$ W/cm²) laser beam with submicron aggregates formed during the rapid expansion into vacuum of the initial supercritical mixture of CO₂+CD₃OD. As a result, a source of fusion neutrons (2.45 MeV) with a peak efficiency of 6×10^4 n/J and bremsstrahlung radiation in the range of 3-100 keV was created.

Предложен новый режим лазерно-плазменной генерации нейтронов и рентгеновских квантов при взаимодействии релятивистского излучения Ti:Sa лазера с субмикронными агрегатами, полученными при быстром расширении исходной сверхкритической смеси CO₂+CD₃OD в вакуум.

Методом молекулярной динамики подтверждена возможность получения в реакторе сверхкритической смеси CO₂ и CD₃OD (соотношение 2:1) при P₀=90 бар и T₀=42^oC, содержащей слабосвязанные дейтерированные наноагрегаты. Анализ (P-T) диаграммы расширения для чистых CO₂ и CD₃OD из найденных начальных условий показывает, что при быстром расширении сверхкритической смеси CO₂+CD₃OD CO₂ переходит в газовую фазу, а CD₃OD в жидкое состояние. В результате, в коническом сопле формируются агрегаты CD₃OD, окруженные газообразным CO₂. С помощью рассеяния Ми оценены средний радиус агрегатов R=450±100 нм и их концентрация n~10⁹ см⁻³. Воздействие на струю проводилось излучением Ti:Sa лазерной системы (E=50 мДж, Δt=50 фс, ν=10 Гц) с интенсивностью I~3×10¹⁸ Вт/см².

Впервые продемонстрирована генерация нейтронов с пиковым выходом 3×10³ н/имп/4π и эффективностью ~6×10⁴ н/Дж, а также тормозных рентгеновских квантов в диапазоне 3-100 кэВ, возникающих при воздействии релятивистских фемтосекундных лазерных импульсов на дейтерированные субмикронные агрегаты. Нейтроны регистрировались с помощью He³-детектора, сопровождающее их рентгеновское излучение измерялось с помощью кремниевой матрицы Greateyes (3-10 кэВ) и полупроводникового детектора MediPIX на чипе CdTe (10-100 кэВ). Ожидаемая эффективность генерации нейтронов при использовании лазерной системы джоульного уровня энергии составляет ~10⁷ н/Дж.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-06035 в части изучения процесса формирования струй наноагрегатов из сверхкритических начальных условий). Разработка методов формирования струй наночастиц проводилась в рамках Госзадания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН Министерства науки и высшего образования РФ.

К. А. АВДЕЕВ, В. С. АКСЁНОВ, И. А. САДЫКОВ, В. А. СМЕТАНЮК, А. С. СИЛАНТЬЕВ, С. М. ФРОЛОВ, Ф. С. ФРОЛОВ, И. О. ШАМШИН

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

ГАЗИФИКАЦИЯ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ УЛЬТРАПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ

В работе впервые продемонстрирована возможность газификации твердых и жидких органических отходов ультраперегретым водяным паром, полученным в импульсно-детонационном пароперегревателе, с выходом синтез-газа (CO+H₂) до 90% об.

K. A. AVDEEV, V. S. AKSENOV, I. A. SADYKOV, V. A. SMETANYUK, A. S. SILANTIEV, S. M. FROLOV, F. S. FROLOV, I. O. SHAMSHIN

Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

GASIFICATION OF LIQUID AND SOLID WASTE BY ULTRASUPERHEATED STEAM

The paper demonstrates for the first time the possibility of gasification of solid and liquid organic wastes by ultra-superheated steam produced in a pulse-detonation superheater with a yield of syngas (CO+H₂) up to 90 vol.%.

Газификация органических отходов водяным паром – это процесс превращения вещества в газообразное состояние благодаря подводу теплоты и водяного пара, необходимых для протекания эндотермических реакций термического разложения. В работе в соответствии с идеями и принципами [1-5], впервые продемонстрирована возможность газификации твердых и жидких органических отходов ультраперегретым водяным паром, полученным в импульсно-детонационном пароперегревателе. Измельченные отходы подавались в реактор сферической формы (объем 100 л) и газифицировались при небольшом избыточном давлении (до 0,3 атм) в мощных вихревых зонах, образуемых встречными импульсными сверхзвуковыми струями перегретого пара, причем охлаждаемые стенки реактора не оказывали существенного влияния на среднюю температуру газификации. Импульсно-детонационный пароперегреватель представлял собой детонационную трубу диаметром 50 мм и длиной 2,7 м с раздвоенной Y-образной секцией, обеспечивающей одновременную подачу встречных импульсных струй в реактор. Детонационная труба была оборудована смесительно-зажигательным устройством и системами подачи метана, кислорода и низкотемпературного (до 150 °С) пара, а также дозаторами жидких и твердых отходов. Предварительные многомерные газодинамические расчеты показали, что для получения высокой средней температуры ультраперегретого водяного пара в реакторе на уровне 2000 °С необходима рабочая частота детонационных импульсов не менее 5 Гц. Для отработки технологии начальной стадии исследования проведены эксперименты по газификации отработанного машинного масла и древесных опилок при низкой частоте детонационных импульсов в 1 Гц, обеспечивающей относительно низкую среднюю температуру в реакторе (на уровне 1000 °С). Состав синтез-газа оказался близким к составу синтез-газа, получаемого другими известными технологиями низкотемпературной газификации органических отходов (см. [4, 5]): получаемый синтез-газ содержал до 90% об. горючих газов (H₂, CO, CH₄) и до 10% об. CO₂.

Дальнейшая работа будет направлена на повышение рабочей частоты импульсно-детонационного пароперегревателя для повышения средней температуры ультраперегретого пара в реакторе до ~2000 °С.

Список литературы

1. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Avdeev K. A., Nabatnikov S. A. Patent of Russian Federation No. 2686138 dated 24.04.2019. Priority dated 26.02.2018.
2. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Nabatnikov S. A. Patent of Russian Federation No. 2683751 dated 01.04.2019. Priority dated 24.05.2018.
3. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Shamshin I. O., Sadykov I. A., Koval' A. S., Frolov F. S. // Applied Thermal Engineering. 2021. V. 183(1). P. 116195. doi: 10.1016/j.applthermaleng. 2020.116195.
4. Frolov S. M. // Fuels. 2021. V. 2. P. 556–651. <https://doi.org/10.3390/fuels2040033>.
5. Фролов С. М. // Горение и взрыв. 2021. Том 14 №3 с. 74-79.

А.В. СКОБЛЯКОВ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.А. ГОЛУБЕВ
НИИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

Создана полномасштабная Монте-Карло модель спектрографа скользящего падения, учитывающая процессы взаимодействия рентгеновского излучения с дифракционной решеткой с помощью дифференциального метода [1, 2, 3], а также трекинг излучения от источника до детектора с учетом всех реальных геометрических параметров эксперимента, в том числе формы поверхности решетки. С помощью созданной модели можно получить аппаратную функцию прибора, которая позволяет восстановить исходные спектры мягкого рентгеновского излучения.

A. V. SKOBLIAKOV, D. S. KOLESNIKOV, A. V. KANTSYREV, A. A. GOLUBEV
NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF EXPERIMENTS FOR X-RAY DIAGNOSTICS OF PULSED PLASMA

A full-scale Monte Carlo model of a grazing incidence spectrograph has been created that takes into account the processes of interaction of X-ray radiation with a diffraction grating using the differential method [1, 2, 3], as well as radiation tracking from the source to the detector, taking into account all the real geometric parameters of the experiment, including the shape of the grating surface. With the help of the developed model, it is possible to obtain the instrumental function of the spectrograph, which allows one to reconstruct the initial spectrum of soft X-rays.

Для регистрации рентгеновских спектров излучения импульсной плазмы (например? в экспериментах с мощными лазерами или Z-пинчами) применяются дифракционные спектрографы скользящего падения. Основными проблемами, препятствующими достоверному качественному и количественному восстановлению входных спектров из данных, считываемых в плоскости регистрации спектрографа (плоскость детектора), являются наложение сигналов от разных порядков дифракции и сложный вид аппаратной функции спектрографа, зависящий от длины волны регистрируемого излучения. Данная задача не имеет тривиального аналитического решения. Построение полномасштабной Монте-Карло модели рентгеновского спектрометра позволяет выполнить расчет аппаратной функции прибора, используемой для восстановления входного рентгеновского спектра.

При моделировании рассчитывается распределение интенсивности рентгеновского излучения в мягком диапазоне после взаимодействия с дифракционной решеткой с малым углом блеска. Была написана программа, в которой производится расчет с помощью дифференциального метода с учетом алгоритма S-матрицы, позволяющем рассчитывать решетки любой глубины штриха и со многими слоями, поскольку в этом случае происходит компенсация роста экспоненциальных функций при умножении матриц рассеяния и прохождения для каждого слоя [1, 2, 3]. Данные о диэлектрической проницаемости материала берутся из базы данных CXRO [4]. В данный момент программа производит расчет при ТЕ поляризации падающего излучения, позволяет учитывать любой форму штриха решетки, а также учитывает ее многослойность. Затем, рассчитанное распределение интенсивности учитывается в Монте-Карло модели, которая учитывает трекинг излучения от источника, все геометрические параметры реального эксперимента, форму дифракционной решетки, а также Вне Роуландовскую систему регистрации.

Список литературы

1. Botten L. C., Cadilhac M., Derrick G. H. et al. Electromagnetic Theory of Gratings // Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York –1980.
2. Popov E. Gratings: Theory and Numeric Applications Chapter 7: Differential Method for Periodic Structures, ISBN: 2-85399-943-4 Second Edition, 2014
3. Michel Nevriere, Evgeny Popov, Light Propagation in Periodic Media Differential Theory and Design, ISBN 9780824708931, Published November 6, 2002 by CRC Press
4. X-Ray Optics Database - URL: <http://www.cxro.lbl.gov/>

А.М. ТЕРЕЗА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ,
А.С. БЕТЕВ, С.П. МЕДВЕДЕВ, С.В. ХОМИК, Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТОНАЦИОННОГО И ДЕФЛАГРАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА И АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Посредством численного моделирования проведен сравнительный анализ экологически вредных компонентов, образующихся при дефлаграционном и детонационном сжигании газообразных продуктов пиролиза (ГПП) полипропилена и автомобильных шин. Показано, что при переходе режима сжигания ГПП от дефлаграционного к детонационному наблюдается увеличение выхода CO_2 и NO_2 . Концентрации другие основных токсичных продуктов сжигания при этом незначительны с точки зрения экологической безопасности.

A.M. TEREZA, G.L. AGAFONOV, E.K. ANDERZHANOV, A.S. BETEV, S.P. MEDVEDEV,
S.V. KHOMIK, T.T. CHEREPANOVA

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF DETONATION AND DEFLAGRATION COMBUSTION OF POLYPROPYLENE AND AUTOMOBILE TIRES GASEOUS PYROLYSIS PRODUCTS

Comparative analysis of environmentally harmful components formed during deflagration and detonation combustion of wastes like polypropylene and automobile tires gaseous pyrolysis products was carried out using numerical calculations. Those wastes combustion mode transition from deflagration to detonation leads to the increase in the yield of CO_2 and NO_2 . Concentrations of other major toxic combustion products are negligible in terms of environmental safety.

Процесс утилизации отходов требует комплексного рационального подхода, основанного на повышении энергоэффективности, экономичности и повышении экологически безопасного выхода конечных продуктов. Одним из направлений является детонационное сжигание газообразных продуктов пиролиза различных органических отходов [1].

Посредством численного моделирования проведена оценка выхода экологически вредных компонентов, образующихся при дефлаграционном и детонационном сжигании газообразных продуктов пиролиза (ГПП) отходов полипропилена и автомобильных шин. Рассматривалось горение стехиометрических смесей ГПП в воздухе при начальном давлении $P_0 = 1$ атм. Начальные концентрации ГПП взяты из [2]. Для расчетов использован программный модуль CHEMKIN-Pro [3]. Температура дефлаграционного сжигания оценивалась по результатам расчета нормальной скорости горения обеих ГПП и составила 2300 К. Температура детонационного сжигания принималась равной 2800 К. Использовался детальный кинетический механизм из [4]. За характерные продукты сгорания горючих смесей в воздухе, как вредных с точки зрения экологии выбросов, рассматривались следующие компоненты: CO , CO_2 , CH_2O , NO , NO_2 , HCN , технический мониторинг которых достаточно хорошо разработан и сертифицирован.

Сравнение режимов горения показало, что при переходе от дефлаграционного к детонационному сжиганию продуктов пиролиза обоих рассматриваемых отходов наблюдается увеличение выхода CO_2 и NO_2 . Другие токсичные продукты при выходе из зоны пламени имеют незначительные концентрации с точки зрения экологической безопасности.

Список литературы

1. Frolov S.M. // Fuels. 2021. V. 2. P. 556.
2. Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Медведев С.П., Мохин Г.Н. // Горение и взрыв. 2020. Т. 13, №3. С. 50.
3. CHEMKIN-Pro 15112, Reaction Design: San Diego, CK-TUT-10112-1112-UG-1, 2011.
4. Cai L., Pitsch H. // Combust. Flame. 2015. V. 162, № 5. P. 1623.

А.О. ХУРЧИЕВ¹, СКОБЛЯКОВ А.В.¹, ПАНИЮШКИН В.А.¹, ГАВРИЛИН Р.О.¹, БОГДАНОВ А.В.¹, КАН-ЦЫРЕВ А.В.¹, ГОЛУБЕВ А.А.¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ IMAGING PLATES ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

Существует несколько типов детекторов для диагностики высокоэнергетичных ионов и электронов. Одним из них является пленочный детектор Imaging Plates, который обладает рядом преимуществ по сравнению с другими детекторами. В данной работе проведена калибровка пленочных детекторов IP BAS-MS и BAS-TR в связке с медицинским сканером VistaScan Mini компании Durr Dental.

A.O. KHURCHIEV¹, SKOBLIAKOV A.V.¹, PANIUSHKIN V.A.¹, GAVRILIN R.O.¹, BOGDANOV A.V.¹, KANTSYREV A.V.¹, GOLUBEV A.A.¹

¹ National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

CALIBRATION OF IMAGING PLATES DETECTORS FOR PULSED PLASMA DIAGNOSTICS

Several types of detectors exist in order to diagnose high-energy ions and electrons. One of its is the Imaging Plates film detector, that has a number of advantages over other detectors. In this work, the IP BAS-MS and BAS-TR film detectors were calibrated in conjunction with the VistaScan Mini medical scanner from Durr Dental.

Существует несколько типов детекторов для диагностики высокоэнергичных ионов и электронов: CR-39, радио-хромные пленки (RCF), сцинтилляторы и пленочные детекторы (Image Plates, IP) [1]. Несмотря на то, что IP являются пассивными детекторами и не могут использоваться в экспериментах с высокой частотой повторения, они обладают несколькими преимуществами перед другими типами детекторов: невосприимчивость к электромагнитным импульсам, большим динамическим диапазоном (до 10^5), высоким пространственным разрешением (обычно 10 – 50 мкм). Кроме этого, пленочный детектор может быть очищен облучением белым светом, что предоставляет возможность повторного использования. Наибольшее распространение в диагностике плазмы получили пленочные детекторы Biological Analysis System (BAS): BAS-MS, BAS-TR, BAS-SR, чувствительной зоной которых является фосфорный слой $BaFBr_{0.85}I_{0.15}:Eu$. При облучении детектора электроны Eu^{2+} в фосфорном слое ионизируются и захватываются в FBr или FI, образуя метастабильные состояния. При сканировании происходит облучение фосфорного слоя фото-нами с энергией 2 эВ, что приводит к перевозбуждению и рекомбинации с Eu^{3+} электронов в метастабильных состояниях и эмиссии фотонов с энергией 3 эВ (фотостимулированное излучение, PSL).

Сигнал с IP (PSL), получаемый после сканирования, пропорционален поглощенной энергии частицы в люминесцентном слое детектора. Однако, не существует теоретического выражения для связи PSL с поглощенной энергией, что приводит к необходимости калибровки связки «детектор - сканер» [2]. Кроме этого, часть электронов в метастабильном состоянии спонтанно рекомбинируют, что приводит к уменьшению сигнала с детектора (fading effect).

В данной работе была проведена калибровка пленочных детекторов BAS-MS и BAS-TR в связке со сканером VistaScan Mini фирмы Durr Dental для электронов и альфа-частиц.

Список литературы

1. P. Bolton, et al. // Phys. Med. 2014. V. 30. P. 255
2. K. Zeil, S.D. Kraft, A. Jochmann et. al. // Review of Scientific Instruments. 2010. V. 81, P. 013307.

В.А. ШАРГАТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ В ВИДЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА-БЮРГЕРСА С ПЕРЕМЕННЫМ ПАРАМЕТРОМ ДИССИПАЦИИ

Рассмотрены решения в виде бегущей волны для обобщенного уравнения Кортевега--де Фриза--Бюргерса, когда функция потока имеет две точки перегиба. Исследуется нелинейная (глобальная) устойчивость решений бегущей волны. Описана эволюция линейно неустойчивых бегущих волн и найдены асимптотики неустойчивых решений.

V.A. SHARGATOV

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

DYNAMICS AND STABILITY OF TRAVELING WAVE SOLUTIONS OF GENERALIZED KORTEVEG - DE VRIES - BURGERS EQUATION WITH NON-CONSTANT DISSIPATION

We consider traveling wave solutions of generalized Korteweg--de Vries--Burgers equation when the flux function has two inflection points. We study the nonlinear (global) stability of traveling wave solutions. Scenarios of the evolution of linearly unstable traveling waves are described, and asymptotics of unstable solutions are found.

Исследована глобальная устойчивость решений в виде бегущей волны для обобщенного уравнения КдВБ с переменным коэффициентом вязкости. В [1] решения уравнения обобщенного уравнения Кортевега--де Фриза--Бюргерса

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial f(v)}{\partial x} = \mu(x - Wt) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - m \frac{\partial^3 v}{\partial x^3}$$

в виде бегущей волны изучались нами в предположении, что коэффициент диссипации μ зависит от времени в переменных (x, t) , т.е. изменение коэффициента диссипации вызвано некоторым внешним воздействием. В [2] мы показали, что такие решения в виде бегущей волны могут быть как линейно устойчивы, так и неустойчивы. В данной статье мы исследуем устойчивость этих решений в нелинейном случае, т.е. глобальную устойчивость. Определены устойчивые решения и асимптотики неустойчивых решений. Найден новый класс нестационарных решений, представляющий спонтанно излучающие волны.

Показано, что линейно устойчивое решение в виде бегущей волны в среде с изменяющимся параметром диссипации устойчиво по отношению к конечным возмущениям. Разрывное решение интегрального уравнения, которое соответствует такой бегущей волне, является допустимым и должно быть включено в гиперболическую модель для уравнения.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial f(v)}{\partial x} = 0$$

Линейно неустойчивые особые разрывы эволюционируют в линейно устойчивый особый разрыв, если такой существует для заданного закона изменения параметров диссипации. Если устойчивого особого разрыва, распространяющегося с той же скоростью нет, то особый разрыв распадается на систему волн, первая из которых представляет собой устойчивый особый разрыв, скорость которого отличается от скорости распространения зоны изменения параметров диссипации. В этом случае такая зона удаляется от возникшей последовательности волн и в асимптотике перестает влиять на решение. При этом зона изменения параметров, распространяясь по однородной среде, изменяет параметр диссипации среды, но это не приводит к возникновению возмущений.

Линейно неустойчивое решение с максимально допустимым для заданного параметра W значением v в конечной точке фазовой траектории эволюционирует к пульсирующему решению, которое имеет эффективную ширину структуры, сравнимую с эффективной шириной структуры бегущей волны. Такое решение является спонтанно излучающей ударной волной, но излучаемые пакеты волн затухают на расстояниях, сравнимых с шириной структуры. Это пульсирующее решение распространяется с той же средней скоростью, которую имела неустойчивая структура. Такой сценарий имеет место даже в том случае, если есть другие решения для бегущей волны типа, которые являются линейно устойчивыми.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №20-11-20141.

Список литературы

1. Chugainova A.P., Shargatov V.A. // European Physical Journal Plus. 2020. V. 113, № 8. P. 635.
2. Shargatov V.A., Chugainova A.P. // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2021. V. 397, 113654.

В.В. ШЕПЕЛЕВ¹, Н.А. ИНОГАМОВ^{2,3}, В.В. ЖАХОВСКИЙ³, Ю.В. ПЕТРОВ², Е.А. ПЕРОВ⁴,
А.Н. ДОЛУДЕНКО⁴

¹Институт Автоматизации проектирования Российской Академии наук (ИАП РАН), Москва, Россия

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ РАН)

³Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ВНИИА)

⁴Объединенный институт высоких температур Российской Академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН, ИНДУЦИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В МЕТАЛЛАХ

Рассматривается распространение и затухание ударной волны, возникающей при облучении сплошной алюминиевой мишени единичным фемтосекундным лазерным импульсом. Процесс исследуется двумя разными способами: с помощью гидродинамической модели, основанной на полуэмпирическом уравнении состояния в форме Ми-Грюнрайзена, и молекулярно-динамическим моделированием, основанном на ЕАМ-потенциале алюминия. Пространственные и временные характеристики распространения волны позволяют сделать обоснованные оценки упрочняющего эффекта, который оказывается на мишень при достаточной величине напряжения, вызванным начальным лазерным нагревом металла.

V. V. SHEPELEV¹, N. A. INOGAMOV^{2,3}, V. V. ZHAKHOVSKY³, YU. V. PETROV⁴, E. A. PEROV²
A. N. DOLUDENKO²

¹ Institute for Computer-aided design of Russian Academy of sciences (ICAD RAS), Moscow, Russia

² L.D. Landau Institute for theoretical Physics of Russian Academy of Sciences (ITP RAS)

³ Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA)

⁴ Joint Institute of high temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF SHOCK WAVES INDUCED BY FEMTOSECOND LASER PULSES IN METALS

Propagation and attenuation of shock wave arising from irradiation of solid aluminum target by single femtosecond laser pulse is considered. The process is investigated by two different approaches: using hydrodynamic model based on a semiempirical equation of state in the form of Mi-Grüneisen, and molecular dynamic modeling based on the EAM potential of aluminum. Spatial and temporal characteristics of the wave propagation make it possible to make reasonable estimates of the hardening effect that appears on the target with a sufficient amount of stress caused by the initial laser heating of the metal.

Задача о распространении и затухании сильной индуцированной лазером ударной волны в металле возникает в контексте исследования технологий лазерного упрочнения металлов, известного в западной литературе как Laser Shock Peening, LSP [1-5]. Технология интенсивно развивается в течение последних десятилетий. Особенный интерес представляет фемтосекундный пининг, характеризующийся сильными ударными волнами и высокими амплитудами напряжений в металле. В настоящий момент, несмотря на успехи в применении LSP для повышения устойчивости коррозии, образованию микротрещин, сопротивляемости усталостным нагрузкам [6], глубинные механизмы, лежащие в основе процесса упрочнения, все еще недостаточно изучены. Комбинируя гидродинамический и молекулярно-динамический подход, удается проанализировать различные стороны процесса упрочнения и получить целостное представление об эффекте.

Гидродинамический подход использует уравнение состояния Мурнагана-Тейта [7]. В молекулярно-динамическом моделировании задействован ЕАМ-потенциал алюминия. Параметры обеих материальных моделей согласуются между собой и определяются по холодной кривой алюминия и данным ударно-волновых экспериментов.

В течение первых десятков пикосекунд ударная волна, изначально распространяющаяся в плоском режиме, претерпевает распад изначально плоского фронта, и режим ее распространения меняется на полусферический с последующим быстрым затуханием. Вследствие этого процесса эффективное ударное упрочнение оказывается возможным только на небольшой глубине, сравнимой с диаметром светового пятна. Полученные в результате моделирования диаграммы напряжения позволяют сделать оценки геометрии и размеров области упрочнения металла.

Список литературы

1. Liao, C. Ye, G. J. Cheng. // Opt. Laser Technol. 2016. V. 78. P. 15–24. doi:10.1016/j.optlastec.2015.09.014.
2. Hoffman J., Chrzanowska J., Moscicki T. et.al. // Appl. Surf. Sci. 2017. V. 417. P. 130–135. doi:10.1016/j.apsusc.2017.01.185.
3. Walsh N., Costello J., Kelly T. // Appl. Phys. B. 2017. V. 123. P. 179. doi:10.1007/s00340-017-6754-3.
4. Kim J., Kim Y., Kim J. // J.Mech. Sci. Technol. 2013. V. 27 (1). P. 2025-2034. doi:10.1007/s12206-012-1263-0.
5. Langer K., Spradlin T. J., Fitzpatrick M. E. // Metals. 2020. V. 10 (1). P. 93. doi:10.3390/met10010093.
6. LSP Technologies: Introduction to Laser Peening, <https://www.lsp technologies.com/wp-content/uploads/2019/03/Intro-to-Laser-Peening-Webinar.pdf>
7. Shepelev V.V., Inogamov N.A., Fortova S.V., Petrov Yu.V. // XXXVI Int. Conf. on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. 2021. P. 148.

Н.С. ШИЛКИН¹, Д.С. ЮРЬЕВ¹, В.Б. МИНЦЕВ¹, А.В. КАНЦЫРЕВ², Д.С. КОЛЕСНИКОВ², А.В. СКОБЛЯКОВ², А.В. БОГДАНОВ², В.А. ПАНЮШКИН², Р.О. ГАВРИЛИН², А.А. ГОЛУБЕВ²,

¹Институт Проблем Химической Физики РАН, Черноголовка, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва, Россия

ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ УДАРНО-СЖАТОЙ ПЛАЗМЫ

Представлены результаты экспериментов по протонной радиографии неидеальной плазмы. Эксперименты были проведены на протонной установке с применением магнитной оптикой ПУМА, оснащенной взрывной камерой. Компактный линейный генератор ударно-сжатой плазмы инертных газов был разработан для выполнения условий радиографического эксперимента. Были определены плотность ударно-сжатой плазмы ксенона и кинематические параметры газодинамического течения. Также представлены результаты других экспериментов на протонном микроскопе ПУМА.

N.S. SHILKIN¹, D.S. YURIEV¹, V.B. MINTSEV¹, A.V. KANTSYREV², D.S. KOLESNIKOV², A.V. SKOBLIAKOV², A.V. BOGDANOV², V.A. PANYUSHKIN², R.O. GAVRILIN², A.A. GOLUBEV²

¹Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

PROTON RADIOGRAPHY OF NON-IDEAL SHOCK-COMPRESSED PLASMA

Experimental results on proton radiography of shock-compressed non-ideal plasma are presented. The experiments were conducted at the proton microscope PUMA equipped with a small blasting chamber. Compact linear explosive generators of shock-compressed plasma of inert gases were developed to fulfill conditions of radiography experiments. The density of shock-compressed plasma of xenon and kinematic parameters of the gas-dynamic flow were determined. Details of related experiments performed at the proton microscope PUMA are discussed also.

Интерес к термодинамическим свойствам неидеальной плазмы возникает при решении задач физики планет-гигантов, астрофизики, а также при реализации ряда практических применений, включая инерциальный термоядерный синтез [1]. К настоящему времени выполнен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований по определению и описанию термодинамических свойств плазмы с сильным межчастичным взаимодействием. Построение строгой теории термодинамических свойств неидеальной плазмы далеко до завершения из-за сложности корректного и надежного учета сильного межчастичного взаимодействия.

Одним из способов генерации неидеальной плазмы является ударно-волновое сжатие тяжелых инертных газов, которое может реализовываться с помощью энергии мощных конденсированных взрывчатых веществ. В случае автомодельных газодинамических течений регистрация кинематических параметров потока позволяет из законов сохранения массы, импульса и энергии на ударном разрыве определять давление, плотность и удельную внутреннюю энергию ударно-сжатой плазмы. Из-за высокой сжимаемости газовых сред значения волновых и массовых скоростей оказываются близки, что приводит к большой погрешности определения плотности. В наиболее интересных областях фазовой диаграммы она составляет величину порядка 10–20%. В этих условиях для определения плотности плазмы целесообразно применять экспериментальные методы, основанные на других принципах.

Метод протонной радиографии [2] выглядит привлекательно для применения в исследованиях свойств неидеальной плазмы. Он основан на регистрации ослабления пучка высокоэнергетичных протонов исследуемым объектом. Его отличительной особенностью является специальная формирующая изображение магнитная оптика, которая применяется для компенсации малоуглового кулоновского рассеяния протонов в мишени и регулировки контраста изображений. Она значительно повышает качество протонно-радиографических изображений по сравнению с системами основанными на фазоконтрастной радиографии или радиографии на потерях энергии протонов в мишени. Отметим, что в мире было создано всего пять установок протонной радиографии с магнитной оптикой для диагностики быстрых динамических процессов, две из которых были спроектированы и построены в России.

Исследование было проведено на протонно-радиографической установке с применением магнитной оптикой ПУМА. Подробное описание установки, экспериментальная программа и особенности проведения взрывных экспериментов представлены в работе [3]. Взрывная камера рассчитанная на подрыв зарядов с тротильным эквивалентом до 70 грамм была интегрирована в ионно-оптическую схему протонного микроскопа. Поле зрения установки составляло 20 мм, что ограничивало размеры мишеней. Линейный взрывной генератор использовался для сжатия и нагрева газообразного ксенона. Радиографические изображения формировались при прохождении протонного пучка через сцинтиллятор из силиката лютеция и записывались на комплекс скоростных цифровых камер. Полученные изображения использовались для определения ослабления пучка протонов, а затем для перехода к массовой плотности мишеней и плотности ударно-сжатой неидеальной плазмы. Были исследованы плазменные состояния с давлением 3–5 кБар, температурой 25–30 кК, плотностью около 0.1 г/см³, параметром кулоновской неидеальности 1.5.

Список литературы

1. Fortov V. E. Extreme States of Matter: On Earth and in the Cosmos. // –2011.– Springer.– Berlin, Heidelberg.
2. King N.S.P., et al. //Nucl. Instrum.Methods Phys. Res. A.–1999.– V. 424. – P. 84-91.
3. Kantsyrev A.V., et al. // Instrum. Exp. Tech. –2014. –V. 57. – P. 1–10.

С.К. АГАФОНОВ

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

ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Исследуется виброустойчивость составных конструкций, отдельные детали которых имеют форму тел вращения. Описано явление взаимного смещения деталей (проворотов) в составных конструкциях, возникающее при воздействии установившейся гармонической или случайной вибрации. Представлены результаты аналитического исследования проблемы, а также их сравнение с экспериментальными данными.

S.K. AGAFONOV

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

VIBRATION STABILITY OF AXISYMMETRICAL COMPOSITE STRUCTURES

This study investigates the vibration resistance of composite structures, some parts of which have the shape of bodies of revolution. The author describes the phenomenon of mutual displacement of parts (twists) in composite structures, arising under the influence of steady harmonic or random vibration. Results of analytical investigation of the problem are presented, as well as their comparison with experimental data.

При вибрационных испытаниях изделий, в состав которых входят тела вращения, неоднократно наблюдался факт изменения первоначальной сборки, выражающийся в относительном смещении смежных деталей, контактирующие поверхности которых имели сферическую или цилиндрическую форму. Данный факт классифицируется как потеря виброустойчивости конструкции. Причем, взаимное смещение было настолько велико и разрушительно, что невольно напрашивалась мысль о каких-то регулярных движениях, обладающих большой энергией, возникающих в момент нагружения конструкции. Следствием потери устойчивости конструкции являлись разрушенные прокладки, срезанные контрольные элементы, задиры на контактирующих поверхностях смежных деталей и т. д.

Вопросам виброперемещения уделялось и уделяется достаточно много внимания, например авторами работ [1–3], но все они, охватывая огромный научный пласт различного рода вибротранспортировок, виброн нагружений, вибростабилизации, обходят стороной те проблемы и вопросы, которые мы постараемся осветить в работе.

В данной работе рассматривается случай, когда осесимметричные детали изделий взаимодействуют по поверхностям контакта, где имеют место как нормальные, так и касательные составляющие напряжения, обусловленные силами трения и давления. Использование аналитического моделирования процесса взаимного смещения деталей в осесимметричных структурах позволяет описывать явление проворота и «обкатывания», наблюдающееся в сложных составных конструкциях. Анализ данных показал достаточно хорошее согласование расчетных и экспериментальных результатов, поэтому вполне возможно проведение расчетов по обоснованию виброустойчивости конструкции уже на стадии эскизного проектирования.

Список литературы

1. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964.
2. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука, 1978.
3. Блехман И. И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М.: Наука, 1980

М.С. АДІГАМОВ, В.Г. СИМАКОВ, И.Р. ТРУНИН, М.А. ТКАЧЕНКО, Ю.В. БАТЬКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Саров, Россия

РЕГИСТРАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОМ ТИТАНЕ VT1-0 И ЕГО СПЛАВЕ ПТЗВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ. СРАВНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

Определена откольная прочность титана VT1-0 и сплава титана ПТЗВ, проанализирована внутренняя структура материала, получена информация о распространении ударных волн и откольных импульсов, измерена амплитуда упругого предвестника, определена ударная адиабата титана VT1-0.

M.S. ADIGAMOV, V.G. SIMAKOV, I.R. TRUNIN, M.A. TKACHENKO, Y.V. BATKOV

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

REGISTRATION OF WAVE FLOWS IN TECHNICALLY PURE TITANIUM VT1-0 AND ITS AL-LOY PT3V UNDER SHOCK LOADING. COMPARISON OF STRENGTH PROPERTIES

The deflection strength of titanium VT1-0 and titanium alloy PT3V was determined, the internal structure of the material was analyzed, information on the propagation of shock waves and shock pulses was obtained, the amplitude of the elastic precursor was measured, the shock adiabat of titanium VT1-0 was determined.

Исследования механических свойств материалов в микросекундном диапазоне длительностей воздействия при ударно-волновом высокоскоростном нагружении проводятся путем изучения структуры волн сжатия и разрежения. При этом структура волн и динамика волновых взаимодействий определяются как термодинамическим уравнением состояния вещества, так и процессами упругопластического деформирования и разрушения материала [1].

Данная работа проведена с целью определения динамических и прочностных характеристик сплава титана ПТЗВ и чистого титана VT1-0 при ударно-волновом нагружении и их сравнения. Сохраненные образцы исследовались методом металлографии. В рамках проведенных экспериментальных исследований представлен сравнительный анализ результатов по деформированию и разрушению титана и его сплава ПТЗВ. В опытах с титановыми образцами впервые был использован вариант постановки экспериментов с одновременным нагружением нескольких образцов, вставленных в общую обойму, ударником, разогнанным в установке пушечного типа до различных скоростей. Регистрация волновых течений с помощью методики PDV при одновременном нагружении в опыте нескольких образцов различной толщины позволила определить скорость распространения ударной волны, зафиксировать затухание упругого предвестника и откольные явления в материале при одной скорости ударного воздействия. Эти экспериментальные данные использовались для определения сдвиговой и откольной прочности титана VT1-0 и его сплава ПТЗВ. Анализ экспериментальных данных показал, что прочностные свойства чистого титана VT1-0 и его сплава различаются: предел текучести сплава больше, чем у VT1-0 в 2,8 раза, откольная прочность – в 1,6 раза. Изменение динамических пределов текучести высокочистого (99,99%) и технического (0,15% - O₂ + 0,18% других металлов) титанов также получено в [2], где показано, что предел текучести в сплаве возрастает примерно в 10 раз по сравнению с чистым Ti (при нормальной температуре испытаний).

Список литературы

- 1 Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортон. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. «Янус-К», М.1996. 407 с.
- 2 Г.И. Канель, С.В. Разоренов, Е.Б. Зарецкий и др. // ФТТ. 2003. Т.5. №4. С. 625-629 с.

И.О.ШАМШИН¹, С.М.ФРОЛОВ¹, В.С.ИВАНОВ¹, В.С.АКСЕНОВ²

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; (ФИЦ ХФ РАН),

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ Москва, Россия

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ

Предложен новый экспериментальный способ оценки детонационной способности (ДС) кислородных смесей, основанный на скоростной видеосъёмке и измерении давления в щелевом зазоре с прозрачными стенками. Полученная картина перехода горения в детонацию (ПГД) в полуограниченном щелевом зазоре может быть использована для верификации кодов, используемых для расчетов рабочего процесса в детонационных двигателях с непрерывной вращающейся детонацией.

I.O.SHAMSHIN¹, S.M.FROLOV¹, V.S.IVANOV¹, V.S.AKSENOV²

¹N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

TRANSITION OF COMBUSTION TO DETONATION IN A SEMI-LIMITED SLOT GAP

A new experimental method for estimating the detonation capacity (DP) of oxygen mixtures based on high-speed video recording and pressure measurement in a slot gap with transparent walls is proposed. The obtained pattern of combustion-to-knock transition (BDT) in a semi-restricted slotted gap can be used to verify the codes used to calculate the working process in detonation engines with continuous rotating detonation.

В настоящее время ведутся активные работы по созданию и испытанию детонационных ЖРД. Первые испытания в космическом пространстве проведены для двигателя с тягой 500 Н.

Ключевым остаётся вопрос запуска вращающейся детонации, а также ранжирования горючих по их ДС и устойчивости рабочего процесса в одинаковых термодинамических и газодинамических условиях.

Для обеспечения минимального запаса прочности конструкции двигателя требуется исключить жесткое инициирование детонации, а также взрывы больших объемов горючего внутри камеры сгорания

Начальная стадия развития рабочего процесса в детонационном двигателе сопровождается значительным увеличением статического давления, действующего на внешние стенки КС.

Рабочий процесс вращающейся детонации происходит в щелевом зазоре цилиндрической формы. Для экспериментального моделирования процесса инициирования создана установка в виде плоской щели с регулируемым зазором от 5 мм до 40 мм между двумя прозрачными плитами ПММА толщиной 40 мм размером 800x400. Заполнение зазора смесью происходит снизу на требуемую высоту через полупроницаемую металлическую стенку длиной 800 мм порционно.

Воспламенение производится искрой на закрытой стенке длиной 400 мм.

Съёмка проводится на видеокамеру Photron FASTCAM SA-Z 2100K, скорость съёмки от 20 000 к/с (1024x1024) до 2 100 000 к/с (128x8).

Экспериментальное исследование начальной стадии развития рабочего процесса в детонационном двигателе проведено на примере модельной плоской щелевой камеры сгорания с отдельной подачей в щелевой зазор этилена и кислорода ($\Phi=1$) и воспламенении смеси искровым разрядом[1].

Иницирование детонации и переход горения в детонацию в щелевом зазоре $\Delta = 6$ мм наблюдались для слоя смеси высотой $h=120$ мм.

Для слоев меньшей высоты наблюдались режимы с распространением пламени без возникновения детонации.

Иницирование детонации в слое предельной высоты существенно уменьшает нагрузку на боковые стенки



камеры сгорания и обеспечит «мягкое» инициирование детонационного рабочего режима.

Работа выполняется при поддержке Министерства науки и высшего образования. Соглашение № 075-15-2020-806 (гос. контракт № 13.1902.21.0014).

Список литературы

1. Frolov S. M., Shamshin I. O., Aksenov V. S. Deflagration-to-detonation transition in stratified oxygen – liquid fuel film systems. Combustion Science and Technology, 2021 (DOI: 10.1080/00102202.2021.1929196)

Н.Н. СЕРЕДКИН^{1,2,3}, К.В. ХИЩЕНКО^{1,3,4,5}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка ⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный

⁵Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СМЕСЕВЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ УРАН-МОЛИБДЕНОВЫХ, УРАН-НИОБИЕВЫХ, УРАН-РОДИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Проведен расчет ударных адиабат для двухкомпонентных сплавов урана с молибденом, ниобием и родием смешевым методом, полагающим аддитивность ударных адиабат компонентов. Проведено сравнение расчета с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов для сплавов U–Mo, U–Rh, U–Nb.

N.N. SEREDKIN^{1,2,3}, K.V. KHISHCHENKO^{1,3,4,5}

¹Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

³Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

⁵South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

CALCULATION OF SHOCK ADIABATS BY THE MIXTURE METHOD FOR URANIUM-MOLYBDENUM, URANIUM-NIOBIUM, URANIUM-RHODIUM ALLOYS AT HIGH PRESSURES

The calculation of shock adiabats for two-component alloys of uranium with molybdenum, niobium and rhodium is carried out by the mixture method, which assumes the additivity of the shock adiabats of the components. The calculation is compared with the available data of shock-wave experiments for U–Mo, U–Rh, U–Nb alloys. Our results obtained by the mixture method are consistent with the experimental data.

Знание термодинамических свойств веществ интересно как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. Сплавы урана, в частности U–Mo, U–Rh, U–Nb, могут использоваться в качестве топлива в ядерных реакторах [1-4]. В настоящей работе проведены расчеты ударных адиабат двухкомпонентных сплавов урана с молибденом, ниобием и родием смешевым методом на основе принципа аддитивности ударных адиабат компонентов [5]. В аддитивном приближении предполагается равенство объема ударно-сжатой смеси и суммы объемов каждого компонента (с соответствующей массовой долей), полученных при их ударном сжатии по отдельности до того же давления: $V_{12}(p) = \alpha_1 V_1(p) + \alpha_2 V_2(p)$, где p — давление; V_{12} — удельный объем смеси; V_1 и V_2 — удельные объемы легкого и тяжелого компонентов при ударном сжатии каждого из них порознь; α_1 и α_2 — их весовые концентрации ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$); двойной индекс 12 означает смесь. Уравнение (1) позволяет по адиабатам смеси и одного компонента найти адиабату другого компонента [5]. Результаты проведенных расчетов ударных адиабат смешевым методом сравниваются с уже имеющимися данными [6, 7] ударно-волновых экспериментов для сплавов U–Mo, U–Rh, U–Nb при высоких давлениях. Полученные смешевым методом результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными (что иллюстрируется графиком на рис. 1).

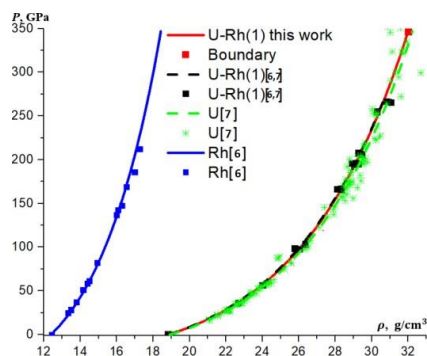


Рис. 1. Ударные адиабаты $p(p)$ для сплава U с Rh (1% по массе).

Список литературы

1. Kalashnikov V. V. et al. // The Soviet Journal of Atomic Energy. 1959. Т. 5. №. 4. С. 1315–1325.
2. Dash S., Ghoshal K., Kutty T. R. G. // Journal of thermal analysis and calorimetry. 2013. Т. 112. №. 1. P. 179–185.3. Duong T. C. et al. // Calphad. 2016. Т. 55. P. 219–230.
4. Suryaman G. K. et al. // Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir. 2018. Т. 24. №. 3.
5. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152.
6. Trunin R. F. et al. Experimental data on shock compression and adiabatic expansion of condensed matter // Sarov: RFNC-VNIIEF. – 2001.
7. Marsh S. P. (ed.). LASL shock Hugoniot data. – University of California press, 1980

**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

ПРИМЕНЕНИЕ ФАПЧ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ

В работе представлены результаты исследований, направленных на разработку приемно-передающих устройств с использованием систем фазовой автоподстройки частоты. Применение ФАПЧ-микросхем позволило улучшить параметры цифро-аналоговых преобразователей при тактовых частотах с высоким уровнем фазовых шумов и при деградации характеристик со временем.

I.S. BATINA, S.P. MASLENNIKOV

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

USE OF PLL TO IMPROVE THE CHARACTERISTICS OF MULTI-CHANNEL DIGITAL TRANCEIVERS

The paper presents the results of research aimed at the development of receiving and transmitting devices using phase-locked frequency systems. The use of PLL chips allowed to improve the parameters of digital-to-analog converters at clock frequencies with a high level of phase noise and with degradation of characteristics over time.

В современном мире остро стоит вопрос надежной и качественной обработки всех видов информации. В повседневной жизни нас окружают сотни сигналов: люди непрерывно пользуются мобильной связью, интернетом, различными навигационными системами. В отдельную группу можно выделить сигналы радиолокации, ведь именно для них прием и передача сигналов должны быть с минимальными потерями и помехами. Однако помехоустойчивое оборудование может применяться и для мобильной системы помощи водителям, и для обнаружения беспилотных летательных средств, а также в других направлениях различного назначения, благодаря низкому электропотреблению и малой стоимости. Связь между приемниками и передатчиками в этих случаях должна быть максимально качественной о каком бы виде ее применения мы не говорили. Поэтому сейчас активно ведутся разработки по улучшению техники как передающей и принимающей сигналы, так и устройств обработки полученной информации.

Применение микросхем фазовой автоподстройки частоты в цифровых передатчиках позволило снизить влияние фазовых шумов тактового сигнала и достигать высоких параметров цифро-аналоговых преобразователей. Эффективность алгоритмов цифровой обработки сигналов зависит от мощности фазовых шумов тактового сигнала, используемого для тактирования микросхем обработки сигналов. На основе результатов исследований был проведен сравнительный анализ режимов работы приемно-передающего тракта при тактировании от источника с высоким уровнем помех напрямую и при подаче этого же сигнала предварительно на микросхему с фазовой автоподстройкой частоты.

Общий вид структурной схемы, применяемой на практике приведен на рисунке 1.

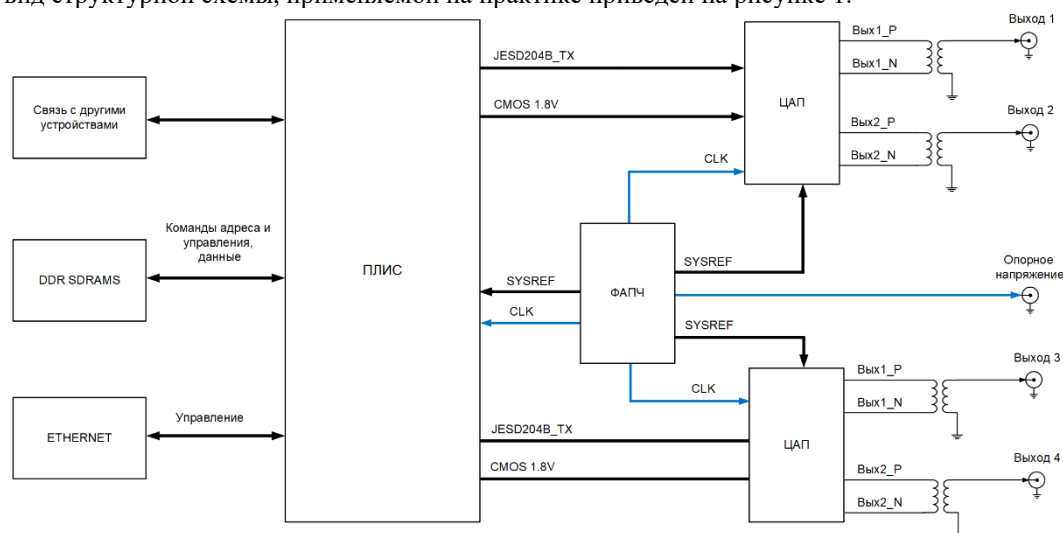


Рис. 1. Упрощенная структурная схема цифрового приемника

Список литературы

1. Рязанцев Л.Б., Лихачев В.П. Оценка дальности и радиальной скорости объектов широкополосной радиолокационной станцией в условиях миграции отметок по каналам дальности // Измерительная техника. № 11, 2017. С. 61-64.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: «Советское радио», 1969.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.

С.Г. БЕЛИЧЕНКО, М.Д. КАРЕТНИКОВ, А.Д. МАЗНИЦИН

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

ЭНЕРГОУГЛОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГАММА-СПЕКТРОВ В УСТРОЙСТВАХ С МЕЧЕНЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Эффект Доплера приводит к сдвигу и уширению пиков гамма-спектра при неупругом рассеянии нейтронов на ядрах. Это необходимо учитывать при обработке спектров гамма-квантов, измеряемых с помощью метода меченых нейтронов. В работе приводятся теоретические оценки и результаты экспериментальных исследований влияния эффекта Доплера на энергетические спектры гамма-квантов из ядер азота, углерода, кислорода в устройстве с мечеными нейтронами.

S.G. BELICHENKO, M.D. KARETNIKOV, A.D. MAZNITSIN

All-Russian Research Institute of Automation. N.L. Dukhova, Moscow, Russia

ENERGY-ANGLE CORRELATIONS WHEN MEASURING GAMMA SPECTRA IN DEVICES WITH TAGGED NEUTRONS

The Doppler effect leads to a shift and broadening of the peaks of the gamma spectrum during inelastic scattering of neutrons by nuclei. This must be taken into account when processing the spectra of gamma rays measured using the tagged neutron method. The paper presents theoretical estimates and results of experimental studies of the influence of the Doppler effect on the energy spectra of gamma quanta from nitrogen, carbon, oxygen nuclei in a device with tagged neutrons.

Результатом измерений устройством с мечеными нейтронами является гамма-спектр при неупругом рассеянии меченых нейтронов на ядрах вещества в элементарных объемах (вокселях), совокупностью которых можно представить исследуемый объект. Путем разложения исходного гамма-спектра на спектры, испускаемыми ядрами отдельных химических элементов, можно определить элементный состав объекта. Результаты анализа весьма чувствительны к относительной погрешности σW определения энергии гамма-квантов: при $\sigma W \approx 1\%$ погрешность определения относительного содержания некоторых элементов возрастает до 10% [1]. Это приводит к необходимости учета эффекта Доплера, приводящего к сдвигу и уширению пиков гамма-спектра, в зависимости от угла между направлениями движения меченых нейтронов и регистрируемых гамма-квантов.

В работе приводятся результаты экспериментальных угловых зависимостей сдвига и уширения пиков гамма-спектра для первого уровня ядра углерода (энергия гамма-кванта 4.438 МэВ и второго уровня азота (2.313 МэВ), измеренных на установке с мечеными нейтронами. Наиболее сильно эти изменения проявляются для возбужденных энергетических уровней ядер с малым временем релаксации, в частности, для первого уровня ядра углерода (энергия гамма-кванта 4.438 МэВ и второго уровня азота (2.313 МэВ) [2]. Также рассматривается анизотропия выхода гамма-квантов неупругого рассеяния относительно траектории меченого нейтрона. Влияние эффекта Доплера и анизотропии выхода гамма-квантов в устройствах с мечеными нейтронами необходимо учитывать при анализе протяженных объектов и/или при многоуровневом расположении гамма-детекторов, когда гамма-кванты попадают на детекторы под различными углами относительно потока меченых нейтронов.

Список литературы

1. Carso C., Perot B., Bernard S. et al. // Nucl. Instrum and Methods. Vol.A588, 2008.- P. 307- 405.
2. Barzilov A., Womble P.C. // J. Radioanal. Nucl. Chem., V.301, 2014.- P. 811–819.-DOI: 10.1007/s10967-014-3189-8.

С.В. ГАВРИШ, С.Г. КИРЕЕВ, Д.Н. КУГУШЕВ, С.В. ПУЧНИНА

Научно – производственное предприятие «Мелитта», Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КСЕНОНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены вопросы конструирования электродных узлов сильноточных импульсных газоразрядных ламп, используемых в качестве высокоинтенсивных источников УФ излучения. Выполнены расчетные и экспериментальные исследования, позволившие создать базовые конструкции электрода и колпачково – стержневого токоввода в разрядный объем импульсной лампы. Приведены результаты изучения физических и химических процессов, происходящих при пайке элементов конструкции.

S.V. GAVRISH, S.G. KIREEV, G.N. KUGUSHEV, S.V. PUCHNINA

Scientific and Industrial Enterprise "Melitta", Ltd

FEATURES OF DESIGNING HIGH-INTENSITY PULSED XENON UV RADIATION SOURCES

The issues of designing electrode assemblies of high-current flash lamps used as high-intensity sources of UV radiation are considered. Computational and experimental studies have been carried out, which made it possible to create the basic design of the electrode and the cap current lead into the discharge volume of the flash lamp. The results of the study of physical and chemical processes occurring during the soldering of structural elements are presented.

Повышение интенсивности УФ излучения импульсных ксеноновых ламп связано с увеличением токовой нагрузки на электродные узлы, которые посредством специальных конструктивных элементов (токовводов), обеспечивают герметичность разрядного объема. Наиболее распространенная в России конструкция фольгового токоввода, не обеспечивает надежность газоразрядной лампы при средних рабочих токах выше 50А [1]. Проведенный научный анализ существующих конструкций электродных узлов импульсных ламп доказал необходимость использования колпачково–стержневого токоввода с электродом, изготавливаемого пайкой составных элементов.

На первом этапе работ проведены расчетные исследования температурных полей электродов с целью создания конструкции паянного электрода с изоляционной втулкой, исключающей проникновения разряда в заэлектродный объем. За основу расчетов была взята предложенная Эрбсом модель теплопроводности с учетом потерь тепла излучением по закону Стефана- Больцмана. По результатам расчетов конструкция электродного узла доработана применительно к двухступенчатому вольфрамовому электроду и импульсному режиму работы. Проведенные расчетные исследования сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными ВЧ нагревом торцевой поверхности электрода и контролем распределения температуры тепловизионной камерой. Полученные результаты в обоих случаях показали качественное совпадение продольного распределения температуры у электрода с диаметрами рабочей поверхности и держателя 5 и 3 мм, соответственно. Рассчитанная температура 1100°С в зоне примыкания держателя с втулкой позволила выбрать в качестве припоя никель и после физико – химического анализа образующихся продуктов реакции при пайке сформировать базовую конструкцию электрода (рис. 1, а).

На втором этапе конструкторских исследований была проработана вариант соединения токоввода с кварцевой оболочкой. Для решения этой задачи был выполнен термодинамический анализ возможности протекания реакций при формировании спая и доказана эффективность активной пайки с использованием титана. В данной работе предложен способ ВЧ пайки оловянными припоями по предварительно нанесенному на кварц магнетронным способом титановому покрытию. Определены коэффициенты растекаемости припоя по соединяемым материалам и рекомендована температура пайки 850°С. Полученные спаи характеризуются высокими прочностью соединения и вакуумными свойствами, что позволило создать базовую конструкцию токоввода (рис.1, б).

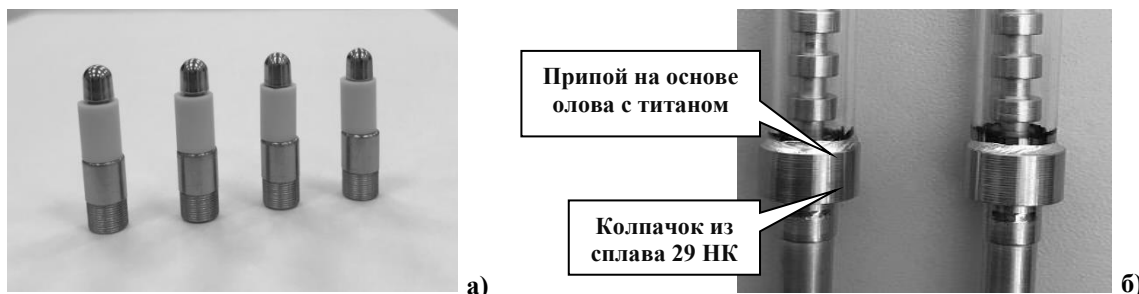


Рис. 1. Разработанные варианты конструкции электрода (а) и колпачково – стержневого токоввода (б).

Для изучения эксплуатационных характеристик была изготовлена опытная партия импульсных ксеноновых ламп. Новые конструктивные и технологические решения обеспечили процент выхода годных изделий 86,5%.

Список литературы

1. Маршак И.С., Дойников А.С., Жильцов В.П. и др Импульсные источники света / М.: Энергия, 1978.– 472 с.

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

В работе описан научно-исследовательский комплекс оборудования, разработанный ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», позволяющий решать широкий спектр научных и учебных задач в областях мощной импульсной электрофизики, физики плазмы, вакуумной техники, генерации и регистрации ионизирующих излучений.

A.K. DULATOV, B.D. LEMESHKO, YU.V. MIKHAILOV, I.A. PROKURATOV

Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Federal State Unitary Enterprise, Moscow, Russia

RESEARCH SYSTEM BASED ON PLASMA FOCUS EQUIPMENT

This article describes a research equipment system designed by FSUE VNIIA to solve a wide range of scientific problems and training tasks in the field of high-power pulsed electrophysics and electrical engineering, plasma physics, vacuum technology, generation and registration of ionizing radiation.

Электрофизические установки на базе камер плазменного фокуса (ПФ) являются одними из наиболее мощных и интенсивных источников ионизирующих излучений. В основе работы установок ПФ лежит эффект сжатия плазмы собственным магнитным полем, который приводит к генерации высокоинтенсивных импульсов электромагнитного излучения. В работе описан научно-исследовательский комплекс оборудования, позволяющий решать широкий спектр научных и учебных задач. В основе комплекса лежит импульсный генератор нейтронного и рентгеновского излучений на базе камер ПФ с длительностью импульсов от 5 до 50 нс. Рассмотрены принципы работы генераторов излучения с камерами ПФ. Описаны особенности конструкции отпаянных камер с генератором газа, обеспечивающим заполнение дейтерием и дейтерий-третиевой смесью для генерации нейтронов с энергией 2,5 МэВ и 14 МэВ соответственно (в диапазоне выхода нейтронов $10^5 \div 10^{12}$ нейтр./имп.), и особенности конструкции исследовательских камер ПФ с вакуумным вентилем для заполнения различной газовой смесью в режиме генерации импульсного рентгеновского излучения (РИ).

Рассмотрены детекторы импульсного нейтронного и рентгеновского излучения, входящих в комплекс, на основе активационной методики, гелиевых счётчиков, сцинтилляционных детекторов с временным разрешением менее 10 нс. Приведены направления исследований, связанные с моделированием динамики формирования, ускорения и сжатия токоплазменной оболочки в камере ПФ (магнитогидродинамическая модель), электротехническое моделирование и экспериментальные работы с мощными электрофизическими установками.

Описанные конструкции исследовательских разборных камер ПФ обеспечивают возможность изучения спектра процессов, сопровождающих сжатие токоплазменной оболочки в пинч на оси камеры ПФ, и последующее формирование направленных плазменных струй вдоль оси камеры ПФ. Результаты исследования жесткого РИ камер ПФ показали, что спектр излучения лежит в диапазоне от 20 до 300 кэВ. Экспериментально показано формирование токовых филаментов на стадии формирования токоплазменной оболочки в количестве более десяти штук, и модификация поверхностей электродов камер ПФ после взаимодействия с токоплазменной оболочкой и направленными плазменными струями.

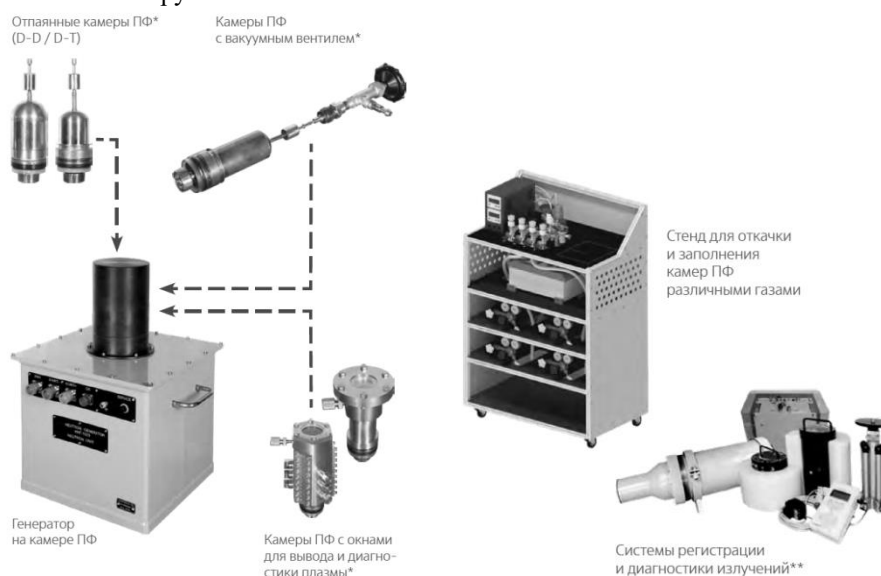


Рис. 1. Возможный вариант состава научно-исследовательского комплекса.

И.А. КАНЬШИН

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ЭКСТРАГИРУЕМОГО ИЗ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА

Представлены результаты компьютерного моделирования динамики пучка ионов изотопов водорода, экстрагируемых из плазменного источника малогабаритного линейного ускорителя. Показаны траектории ионного пучка, “холодных” ионов, образованных в результате перезарядки, а также вторичных электронов. Изучено влияние магнитного поля на величину электронной нагрузки в ускоряющей системе линейного ускорителя

I.A. KANSHIN

Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

SIMULATION OF CHARGED PARTICLE BEAM DYNAMICS EXTRACTED FROM A PLASMA SOURCE

The results of computer simulation of the hydrogen isotopes beam dynamics extracted from a plasma source of small linear accelerator are presented. The trajectories of the ion beam, “cold” ions formed as a result of charge exchange process, as well as secondary electrons are shown. The influence of the magnetic field strength on the electronic load in the accelerating system of a linear accelerator is studied.

Плазменный источник пеннинговского типа является одним из узлов малогабаритного линейного ускорителя ионов, предназначенного для генерации нейтронов [1-2]. В данном источнике в импульсном режиме генерируется плазма в среде изотопов водорода, из которой путем подачи на электроды ускоряющей системы постоянного отрицательного относительно земли потенциала извлекаются ионы изотопов водорода. Далее ионы ускоряются к мишени, где происходят реакции с образованием нейтронов [3].

В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования в COMSOL Multiphysics динамики пучка ионов изотопов водорода, экстрагируемых из плазменного источника. Моделирование проводилось с учетом перезарядки ионов на молекулах нейтрального газа в ускоряющей системе [4]. Одновременно в расчетах учитывался процесс вторичной ион-электронной эмиссии (ВИЭ) с поверхностями ускоряющей системы, подвергающихся бомбардировке как быстрыми, так и медленными ионами. Пример результатов моделирования приведен на рис. 1. Рассмотрение процесса ВИЭ позволило определить значение электронной нагрузки, которая приводит к снижению величины нейтронного потока, генерируемого линейным ускорителем. Показана динамика электронного пучка в отсутствие системы его подавления (рис. 1б).

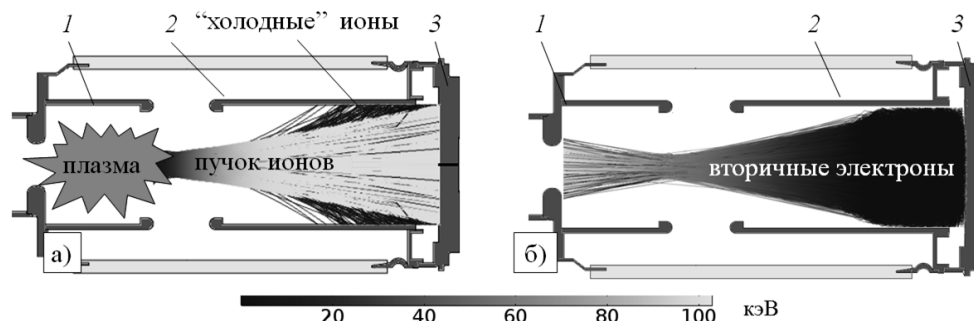


Рис. 1. Траектории ионного пучка и “холодных” ионов перезарядки в ускоряющей системе (а) и траектории вторичных электронов в отсутствие системы их подавления на мишенном узле ускорителя (б). 1 – плазменный источник, 2 – высоковольтный электрод ускоряющей системы, 3 – мишенный узел

Включение в траекторный анализ моделирования магнитного поля в мишенном узле позволило оценить его влияние на величину электронной нагрузки в ускоряющей системе линейного ускорителя ионов.

Список литературы

1. N.V. Mamedov, D.E. Prokhorovich, D.I. Yurkov et al.// Instr. and Exper. Tech., vol. 61, no. 4, pp. 530–537, 2018, DOI: 10.1134/S0020441218030223.
2. N V Mamedov, D V Kolodko, I A Sorokin et al.// IOP Conf. Series: J. Physics Conf. Series. vol. 830, p.012063, 2017, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/830/1/012063>.
3. I.A Kanshin // Tekhnol. Elektromagn. Sovmestimosti, vol. 3 (66), 2018, pp. 26-35.
4. Болдасов В.С., Денбновецкий С.В., Кузьмичёв А.И. Моделирование газоразрядных коммутирующих приборов низкого давления. Электрическая прочность приборов в предразрядный период. – Киев ИСИО, 1996.- 140 с.

С.В. КОЛЕСНИКОВ, А.П. ДЕНИСЕНКО, Н.В. БОЙКО, С.Г. РУДАКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЙ СЦИНТИЛЛЯТОРОМ $ZnS(Ag)+{}^6LiF$

Проведено исследование характеристик сигналов сцинтиллятора $ZnS(Ag)+{}^6LiF$ в ответ на нейтронное и гамма-излучение с целью выяснения возможности применения данного сцинтиллятора в качестве альтернативы гелиевым счетчикам нейтронов. Продемонстрирована возможность разделения сигналов от гамма-излучения и тепловых нейтронов по амплитуде и длительности.

S.V. KOLESNIKOV, A.P. DENISENKO, N.V. BOYKO, S.G. RYDAKOV

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

STUDY OF THE POSSIBILITY OF NEUTRON/GAMMA DISCRIMINATION BY A SCINTILLATOR $ZnS(Ag)+{}^6LiF$

Investigation was carried out into the signal characteristics of the $ZnS(Ag)+{}^6LiF$ scintillator in response to neutron and gamma radiation in order to use this type of scintillators as an alternative to helium neutron counters. The possibility is demonstrated of separating signals from gamma radiation and thermal neutrons by amplitude and width of pulses.

Сцинтиллятор $ZnS(Ag)+{}^6LiF$ за счет реакции ${}^6Li(n,t){}^4He$ чувствителен к потоку тепловых нейтронов и практически не чувствителен к гамма-излучению из-за малой толщины [1]. При поглощении одного теплового нейтрона испускается $1,6 \times 10^5$ фотонов [2]. Однако характеристики импульсов от нейтронов и гамма-квантов зависят от конструкции конкретного детектора и измерительного тракта.

Для исследования характеристик сигналов был собран экспериментальный стенд, схема которого приведена на рисунке 1. Стенд состоит из тонкой пластины $ZnS(Ag)+{}^6LiF$ толщиной 0.5 мм, приклеенной на одну из граней прямоугольного светопровода из оргстекла, размеры которого составляют $6 \times 6 \times 100$ мм. Сбор света осуществляется с боковой грани светопровода с помощью SiPM MICROFC-60035-SMT (размер матрицы 6×6 мм). Сигнал снимался с медленного выхода SiPM и усиливался с помощью предварительного усилителя, после чего подавался на осциллограф или цифровой дигитайзер CAEN DT5730B.

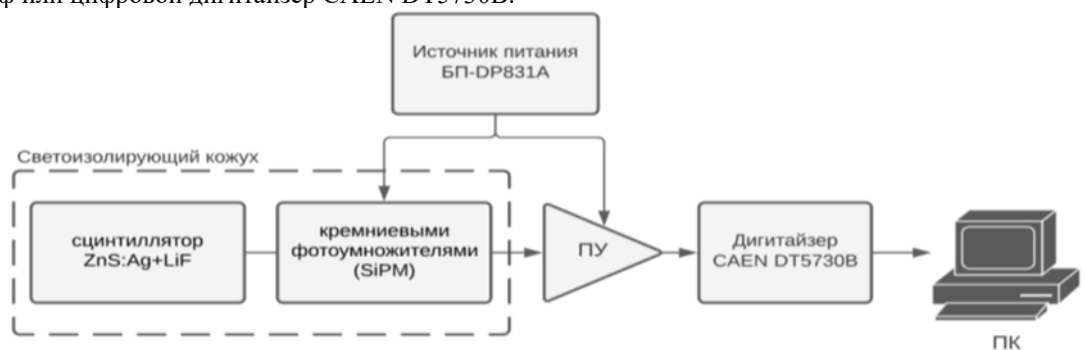


Рис.1. Функциональная схема стенда для анализа импульсов

Первоначально в качестве источника гамма-квантов был взят ${}^{137}Cs$ активностью 10^5 Бк, однако зафиксировать импульсы не удалось даже при размещении источника и детектора вплотную, что объясняется низкой эффективностью регистрации [3]. Поэтому в качестве альтернативы гамма-квантам использовался источник электронов ${}^{90}Sr-{}^{90}Y$. Формирование потока тепловых нейтронов осуществлялось с помощью источника ${}^{238}PuBe$, помещенного в полиэтиленовый контейнер с толщиной стенки 10 см.

Отношение амплитуд импульсов от теплового нейтрона и электрона составляет как минимум один порядок, отношение длительностей импульсов – несколько раз. Используя различные уровни дискриминации сигнала, можно добиться разделения двух типов сигналов.

Проведенные исследования показали также, что в ходе экспериментов с DT-генератором сцинтиллятор регистрирует рентгеновское излучение, влияние которого снижается добавлением свинцового листа толщиной 2 мм.

Список литературы

1. Litvin V.S. et al. //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2009. – Т. 73. – №. 2. – С. 219-221.
2. Osovizky A. et al. //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2018. – Т. 65. – №. 4. – С. 1025-1032.
3. Рябева Е.В., Кадилин В.В., Идалов В.А. // [Атомная энергия](#). 2019. Т. 127. № 1. С. 43-47.

РАЗРАБОТКА СВЕРХМОЩНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА S-ДИАПАЗОНА КИУ-278

В АО «НПП «Торий» был разработан и изготовлен сверхмощный импульсный усилительный клистрон S-диапазона длин волн КИУ-278. Клистрон работает в диапазоне частот 2846-2866 МГц с максимальной выходной импульсной мощностью 8 МВт и коэффициентом усиления 50 дБ при напряжении катода не более 58 кВ.

D.A. KOMAROV, E.P. YAKUSHKIN, YU.N. PARAMONOV, S.V. SURKOV

JSC "RPE "Toriy", Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A HIGH-POWER S-BAND AMPLIFIER KLYSTRON KIU-278

A high-power pulsed amplifier klystron of the S-wavelength range KIU-278 was developed and manufactured at JSC "RPE "Toriy". The klystron operates in the frequency range 2846-2866 MHz with a maximum output pulse power of 8 MW and a gain of 50 dB at a cathode voltage of not more than 58 kV.

Наиболее актуальной задачей в СВЧ электронике больших мощностей является снижение потребляемой мощности и улучшение массогабаритных характеристик.

Применение многолучевых электронных пушек и соответствующих электродинамических систем позволяет в несколько раз уменьшить величину катодного напряжения в сравнении с однолучевыми конструкциями, при этом существенно уменьшается масса и габариты как клистрона, так и источников питания.

Для достижения достаточно высоких значений КПД таких приборов величина парциального первеанса пушки не должна превышать (0,5 – 0,7) мкА/В^{3/2}. Исходя из этого, было выбрано двухрядное расположение катодов с их общим числом равным 30. Общее сопротивление электронного потока составило 208 Ом. При характеристическом сопротивлении порядка 20 Ом, столь низкое сопротивление луча означает, что в выходном каскаде клистрона необходимо обеспечить очень малые значения нагруженной добротности. В результате моделирования выходного каскада многолучевой системы благодаря применению метода, описанного в [1], максимальная величина перепада сопротивления в зазорах различных каналов составила 1,02, что соответствует коэффициенту использования мощности 0,97.

Исходя из требуемого коэффициента усиления и вычисленных значений характеристического сопротивления, была выбрана классическая схема клистрона с пятью резонаторами, в котором амплитуда второй гармоники наращивается увеличением пролетного пространства между четвертым и пятым резонатором до необходимого уровня электронного КПД. В результате оптимизации в программе KLYS-5.63 [2] были получены следующие результаты: предельный КПД составил 66% при уровне входной мощности 33 Вт. На рисунке 1 представлена амплитудная характеристика на рабочей частоте клистрона. Образец КИУ-278 с магнитной системой представлен на рисунке 2.

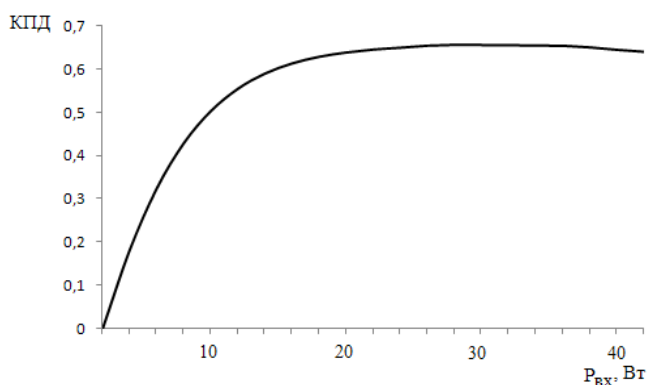


Рис. 1. Амплитудная характеристика клистрона

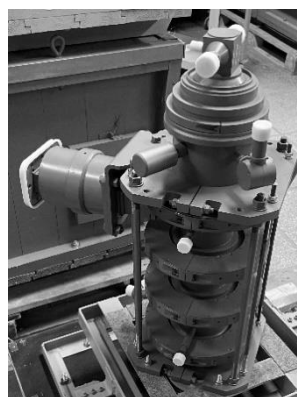


Рис. 2. Фотография клистрона КИУ-278

В результате проектирования были изготовлены образцы сверхмощного импульсного усилительного клистрона КИУ-278, которые успешно прошли испытания и показали электродинамические и технические характеристики, требуемые по техническому заданию.

Список литературы

1. D. A. Komarov, E. P. Yakushkin, Y. N. Paramonov, S. E. Sharkov. Increased efficiency of high-power multiple-beam klystrons based on optimization of the output cavity. IVEC 2018.
2. Malykhin A.V., Yakushkin E.P., Kononov A.V/ Validation of klystrons development code – KLYS 4.5/Pros. IEEE2003, pp. 101-102

Д.В. ЛУНЕВ, Е.В. РЯБЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРОННО-AКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПШЕНИЦЕ

Смоделированы гамма-спектры в разные временные отрезки после облучения пшеницы быстрыми нейтронами. Проведен анализ возможности обнаружения вредных веществ, таких как ртуть, мышьяк, кадмий.

D.V. LUNEV, E.V. RYABEVA

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

THE POSSIBILITIES OF NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS OF THE CONTENT OF HARMFUL SUBSTANCES IN WHEAT

Gamma spectra were modeled at different time intervals after irradiation of wheat with fast neutrons. The analysis of the possibility of detecting harmful substances, such as mercury, arsenic, cadmium, was carried out.

Нейтронно-активационный анализ представляет собой метод качественного и количественного определения элементов, основанный на измерении характеристик излучения радионуклидов, образующихся при облучении материалов нейтронами. Методика нейтронно-активационного анализа основана на измерении параметров излучения, испускаемого при распаде радиоактивных ядер, образовавшихся в результате облучения материала нейтронами [1-3].

В настоящей работе рассмотрены методы нейтронно-активационного анализа для детектирования вредных веществ в пшенице. Рассмотрен элементный состав пшеницы, включая такие вредные вещества, как ртуть, кадмий и мышьяк с предельным разрешенным уровнем их содержания в пшенице. Предельно допустимый уровень содержания ртути составляет 0,03 мг/кг, мышьяка – 0,2 мг/кг, кадмия – 0,1 мг/кг. Смоделированы спектры гамма-активности после облучения быстрыми нейтронами и их изменение со временем после облучения. Спектры были фиттированы с учетом энергетического разрешения выбранного гамма-спектрометра LaBr₃, которое составляет 6%.

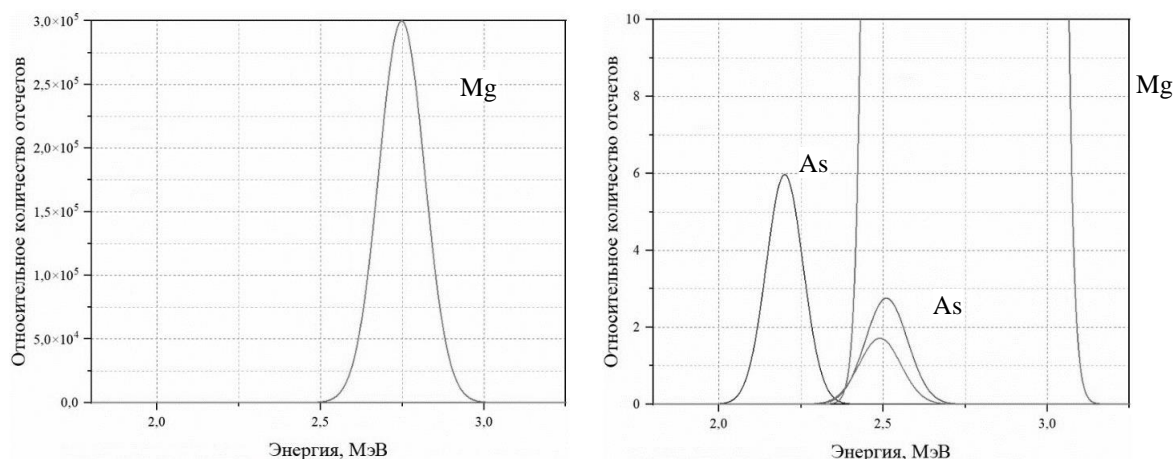


Рис. 1. Вид гамма-спектра спустя 800 минут после облучения (справа увеличена область 2,5 МэВ).

На основе полученных модельных спектров были сделаны выводы о возможности обнаружения пиков гамма-квантов от мышьяка с помощью линии 2,2 МэВ. Линии кадмия и ртути перекрываются пиками других веществ при использовании детектора LaBr₃. На рисунке 1 представлен гамма-спектр в районе 2,5 МэВ спустя 800 минут после облучения, что много больше периода полураспада кремния. С помощью данного детектора возможно обнаружить мышьяк в пшенице с содержанием на границе допустимого уровня 0,2 мг/кг по пику в области 2,5 МэВ.

Для обнаружения других вредных элементов необходимо использовать детекторы с меньшим энергетическим разрешением и подбирать определенные временные промежутки, позволяющие выделить пики гамма-квантов от других вредных веществ.

Список литературы

1. R. H. Filby // Pure and Applied Chemistry – 1995 – Vol. 67, No. 11 – С. 1929 - 1941.
2. H.R. Verma Atomic and nuclear analytical methods: XRF, mössbauer, XPS, NAA and ion-beam spectroscopic techniques. - New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007. - 375 с.
3. Witkowska E., Szczepaniak K., Biziuk M. // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. - 2005. V. 265, No.1. p.141-150.

И.М. МАМЕДОВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОТУ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований амплитудных и временных характеристик вытягиваемого тока малогабаритных ионных источников Пеннинга при изменении величины и конфигурации магнитного поля в условиях низкочастотного режима работы системы импульсного питания. По результатам расчетного моделирования предложены и успешно апробированы варианты построения неоднородных магнитных систем, обеспечивающих условия для стабильной работы ионных источников в составе геофизической аппаратуры.

I.M. MAMEDOV, S.P. MASLENNIKOV

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

STUDY OF MAGNETIC FIELD INFLUENCE ON OPERATION OF SMALL-SIZED ION SOURCES

The experimental results are presented. The extracted current amplitude and time characteristics of small-sized Penning ion sources were measured. Magnetic field value and configuration were changed under conditions of the pulse power system low-frequency operation. According to the simulation results, the construction of nonuniform magnetic systems providing conditions for stable operation of ion sources in geophysical equipment are proposed and successfully tested.

Малогабаритные ионные источники с разрядными ячейками Пеннинга получили широкое распространение в импульсных нейтронных генераторах, применяемых в различных областях, таких как ядерная медицина, неразрушающий контроль подозрительных предметов, научные исследования, каротаж нефтегазовых месторождений и др. В ионном источнике Пеннинга возбуждается электрический газовый разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях при давлении рабочего газа (дейтерий) 1 - 10 мТорр. Извлекаемый из ионного источника поток ионов, ускоряясь в направлении мишени нейтронной трубки, приобретает энергию ~80 - 90 кэВ. Амплитудно-временные характеристики формируемых нейтронных импульсов зависят от режимов горения разряда в ионном источнике. Ключевыми параметрами, определяющими условия зажигания разряда и стабильность работы ионного источника, являются распределение и напряженность магнитного поля в разрядной ячейке.

По результатам исследований определены конфигурации распределения магнитного поля, при которых амплитудно-временные характеристики разрядного и вытягиваемого токов малогабаритных ионных источников удовлетворяют условиям эксплуатации в аппаратуре геофизических исследований скважин. Исследования процессов генерации разряда в ионных источниках проведены в условиях низкочастотного режима работы системы импульсного питания: частота следования импульсов 625 Гц, длительность импульса 100 мкс. Регулировка напряженности магнитного поля в опытных образцах ячеек Пеннинга в ходе экспериментальных исследований обеспечивалась за счет использования составных магнитных систем с постоянными кольцевыми магнитами и токовыми катушками. Для создания магнитных полей с различной степенью неоднородности распределения магнитная система смещалась относительно центра ионного источника.

Результаты исследований показали, что в условиях формирования в разрядной ячейке однородного магнитного поля разрядные импульсы характеризовались большим числом токовых осцилляций, нестабильными амплитудными параметрами и затянутым временем задержки зажигания разряда. При использовании сильно неоднородного магнитного поля, при котором по длине ионного источника индукция поля изменялась более чем на 20%, наблюдалась высокая нестабильность амплитуды вытягиваемого тока. В этих режимах работы ионного источника нарушались условия генерации нейтронных потоков, требуемых для применения в составе аппаратуры геофизических исследований скважин. Наиболее стабильные режимы зажигания разряда обеспечивались при слабо неоднородном распределении магнитных полей в ионном источнике со спадом индукции поля в направлении антикатада вдоль оси разрядной ячейки на величину около 10 %.

По результатам моделирования предложены варианты исполнения неоднородных магнитных систем, составленных из кольцевых магнитов с различной собственной намагниченностью. Были рассмотрены и практически апробированы магнитные системы с магнитами с индукцией отдельного магнитного кольца в его геометрическом центре от 48 мТл до 64 мТл. Предложенные магнитные системы были успешно протестированы на реальных образцах нейтронных трубок для геофизической аппаратуры.

Список литературы

1. [Mamedov N.V., Maslennikov S.P., Solodovnikov A.A., Yurkov D.I.](#) // Plasma Physics Reports, 2020, 46(2), p. 217–229;
2. [Mamedov N.V., Gubarev A.V., Zverev V.I.](#), et al. // Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(2), 025001.

С.П. МАСЛЕННИКОВ, П.Г. ВАСИЛЬЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАКЕТНО-ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПЕННИНГА

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов работы и амплитудно-временных характеристик малогабаритных ионных источников Пеннинга в условиях пакетно-импульсного управления в зависимости от давления рабочего газа, амплитуды разрядного тока, длительности пауз между пакетами импульсов управления.

S.P. MASLENNIKOV, P.G. VASILYEVA

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

STUDY OF BURST-PULSED REGIMES OF SMALL-SIZED PENNING ION SOURCES

The results of experimental studies of the operating regimes and amplitude-time characteristics of small-sized Penning ion sources are presented. Experiments were carried out with Penning ion sources under the conditions of burst-pulsed control depending on the pressure of the working gas, the amplitude of the discharge current, and the duration of pauses between bursts of control pulses.

Эффективность и результативность применения каротажного оборудования во многом определяются амплитудно-временными характеристиками нейтронных потоков, зависящих от параметров магнитного поля, импульсов анодного напряжения, состава и давления газа. Ионные источники Пеннинга используются в портативных импульсных нейтронных генераторах в составе геофизической аппаратуры. Пакетно-импульсный режим позволяет дополнительно регистрировать фоновый спектр естественных потоков излучения и гамма-излучения наведенной активности. С помощью анализа полученных гамма-спектров определяется относительное содержание в породе составляющих ее элементов, пористость и литологический состав горных пород.

Исследование режимов горения разряда и амплитудно-временных характеристик ионных источников проводилось на лабораторном стенде, который воспроизводил условия пакетно-импульсного управления, близкие к реальным при эксплуатации в аппаратуре геофизического исследования скважин.

Результаты исследований показали, что при давлениях газа (дейтерий) $P \approx 1$ мТорр формирование разряда было нестабильным с задержкой зажигания в 20 – 25 мкс относительно фронта импульса анодного напряжения. В диапазоне давлений $P = 3 - 4$ мТорр обеспечивалась хорошая повторяемость амплитудных и временных параметров тока разряда. На импульсах вытягиваемого тока формировалась четко выраженная плоская вершина. Длительность задержки зажигания разряда составляла около 10 мкс. При давлении газа до $P = 6$ мТорр задержка уменьшалась до значений 5 – 7 мкс.

Скорость восстановления электропрочности межэлектродных промежутков зависит от условий горения предшествующих импульсных разрядов: мощности; длительности; давления и состава газовой среды; конфигурации электродной системы и т.д. Процессы распада плазмы и деионизации газа ускоряются при снижении давления газа в разрядной ячейке и уменьшении амплитуды разрядного тока, что затрудняет повторное срабатывание ионного источника при поступлении нового пакета импульсов. При использовании пакетно-импульсного режима управления повторное включение ионного источника происходит с пропусками срабатываний на первых импульсах напряжения при поступлении новых пачек импульсов, причем число пропущенных разрядных импульсов при неизменных рабочих условиях подвержено значительному статистическому разбросу.

Проведены исследования амплитудно-временных характеристик магнитно-изолированного разряда в условиях пакетно-импульсного питания и процессов включения ионного источника в зависимости от тока разряда. Результаты показали, что после миллисекундных пауз повторное включение ионного источника происходило с пропусками срабатываний на первых импульсах напряжения. При разрядном токе в диапазоне 0.5 – 0.8 мА средние потери составляли не более одного импульса в начальной части пакета. При токе разряда около 0.2 мА терялось 15 - 20% импульсов управляющего напряжения. Следует отметить, что импульсы ионных потоков, формируемых на первых включениях ионного источника, имели меньшую длительность по сравнению с его последующими срабатываниями.

Список литературы

1. Baicker J. A., Sayres A., Schladale S., Dudek J. and Stone J. M. Carbon // Oxygen Logging using a pulsed neutron generator and a germanium cryosonde, PGT. Geophysics, Inc., Princeton, NJ 08 0, 1985A.
2. Боголюбов Е.П., Копылов С.И., Полканов Ю.Г., Титов И.А., Юрков Д.И. // Труды межд. научно-практ. конф. (1-4 октября 2013 г., г. Бугульма, Республика Татарстан). – М.: ВНИИгеосистем, 2013. – С. 84 – 89.
3. Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Миллер В.В. и др. Развитие аппаратно-программных комплексов импульсного нейтронного каротажа во ВНИИА им. Н.Л. Духова. Аппаратурно-методические комплексы для геофизических исследований нефтегазовых и рудных скважин. Научно-технический сборник. – М.: ВНИИгеосистем, 2012. – с. 53-56.

И.А. ПРОКУРАТОВ, А.К. ДУЛАТОВ, Б.Д. ЛЕМЕШКО, Ю.В. МИХАЙЛОВ

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

СИСТЕМА НА ВСТРЕЧНЫХ ИОННЫХ ПУЧКАХ НА ОСНОВЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе описана система на встречных ионных пучках, разработанная на основе отпаянной нейтронной трубки с двумя источниками ионов для реализации инерциального электростатического удержания плазмы. Система используется в качестве источника нейтронного излучения. Представлены результаты экспериментальных исследований системы, описан метод расчета выхода нейтронного излучения, обобщающий основные особенности работы подобных систем.

I.A. PROKURATOV, A.K. DULATOV, B.D. LEMESHKO, YU.V. MIKHAILOV

Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Federal State Unitary Enterprise, Moscow, Russia

THE SYSTEM WITH CONTER ION BEAMS BASED ON INERTIAL ELECTROSTATIC CONFINEMENT OF PLASMA FOR NEUTRON RADIATION GENERATION

This article describes the counter ion beams inertial electrostatic confinement device based on sealed-off neutron tube with two ion sources. This system is used as a neutron source. The results of experimental investigations and descriptions of the method of neutron yield calculation which generalize the main features of inertial electrostatic confinement systems are presented in this article.

Системы инерциального электростатического удержания плазмы (ИЭУП) исследуются для различных прикладных задач с 50-х годов XX века. Отдельной областью применения подобных систем является их использование в качестве генераторов нейтронного излучения. В данной работе описана система ИЭУП, построенная на встречных ионных пучках, разработанная на основе отпаянной нейтронной трубки с двумя источниками ионов. Система используется в качестве источника нейтронного излучения. Работа системы с использованием обоих ионных источников показана на рис. 1.

Представлены результаты экспериментальных исследований системы, включающие в себя: изучение режимов работы источников ионов (ИИ), формы горения разряда, анализ режимов работы системы при различных токах (0,2 – 2 мА) и ускоряющих напряжениях (10 – 80 кВ), измерение нейтронного выхода.

Увеличение ускоряющего напряжения приводило к улучшению фокусировки разряда. Работа с токами трубки выше 1,5 мА показала изменение геометрии горения разряда в основном ускоряющем промежутке, приводящее к потере соосности разряда.

При проведении экспериментов с использованием дейтерия нейтронный выход системы достигал $3 \cdot 10^5$ нейтр./с (80 кВ, 0,4 мА).

Во второй части работы описан метод расчета выхода нейтронного излучения, обобщающий основные особенности работы систем ИЭУП. Проведена верификация данного метода для широкого набора установок ИЭУП в диапазоне нейтронного выхода $10^4 - 10^8$ нейтр./с, показавшая удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными. Используя данный метод рассмотрена возможность увеличения нейтронного выхода разработанной системы.

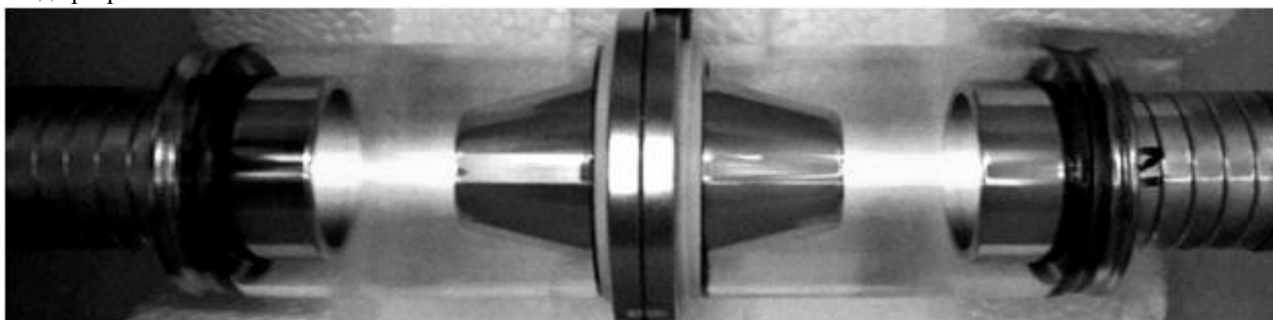


Рис. 1. Внешний вид разряда с ИЭУП в системе с двумя встречными источниками ионов.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ И РАДИОМЕТРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В работе приводятся результаты разработки технологии изготовления, радиометрическая характеристика полупроводникового детектора большого размера на основе гетероперехода n-Ge-p-Si диаметром 80 мм и толщиной чувствительной области 100 мкм, а также структура радиометра. Приведены данные мониторинга концентрации (объемной активности) радона, температуры и влажности в почвенном слое.

S.A. RADZHAPOV, F.G. MULLAGALIEVA, B.S. RADZHAPOV, M.A. ZUFAROV
Physical-Technical Institute of Scientific Association of "Physics-Sun", Tashkent, Uzbekistan

DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE SEMICONDUCTOR DETECTORS AND RADIOMETERS OF IONIZING RADIATION

The paper presents the results of the development of manufacturing technology, the radiometric characteristic of a semiconductor detector based on a large size n-Ge-p-Si heterojunction with a diameter of 80 mm and a sensitive area thickness of 100-200 μm , and the structure of the radiometer. The data of monitoring the concentration of radon, temperature, humidity in the soil layer are given.

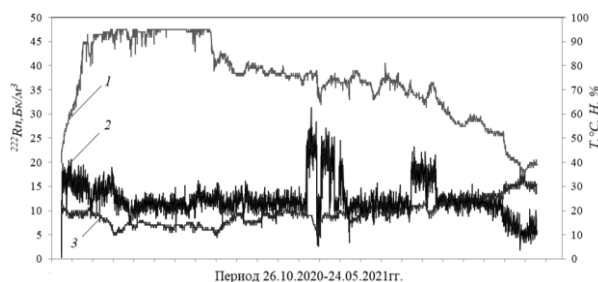
При работе с радио активными изотопами, для геологических поисково-разведочных работ, металлургии, охране окружающей среды необходимы приборы, регистрирующие излучения слабой активности. В связи с этим нужны высокочувствительные приборы, которые должны быть компактными и безопасными. Актуальность создания такого прибора также определяется необходимостью экспрессного измерения α -излучения (^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn и т.д.) естественных изотопов в различных средах.

Полупроводниковые «гетеропереходные» Al-n-Ge-p-Si-Au детекторы изготавливались из p-кремния. Удельное сопротивление исходных пластин варьировалось в диапазоне 3-8 кОм·см, время жизни неосновных носителей составляло 700÷1000 мкс. Методом вакуумного напыления при давлении 3×10^{-5} Торр, на пластины p-Si наносили n-Ge толщиной 300Å и контакты Al(500Å) и Au (300Å). Изготовленные детекторы имели следующие характеристики: диаметр 80 мм, толщина чувствительной области 0,1-0,2мм при рабочем напряжении $U_{\text{раб}} = 10 \div 50$ В, «темновой» ток $I_{\text{обр}} = 0,3 \div 1,5$ мкА, емкость $C = 1500 \div 1750$ пФ, энергетический эквивалент шума $E_{\text{ш}} = 40 \div 52$ кэВ, энергетическое разрешение по α -излучению ^{226}Ra энергией 7,65 МэВ составляло 86 кэВ при температуре $T = +27$ °С. [1].

На основе детекторов большого размера был разработан и создан радиометр [2], состоящий из рабочей камеры с детектором, узла усиления и селекции информации, микроконтроллера, узла вторичного электропитания, воздухозаборника, персонального компьютера с установленным программным обеспечением, GSM/SMS-модуля, для проведения измерений в онлайн режиме (Рис. 1-а).



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид радиометра а); исследования почвенного слоя (б): 1 — изменение влажности во времени 2 — изменение интенсивности объемной активности радона во времени, 3 — изменение температуры во времени.

Радиометр может проводить измерения объемной активности α -излучения, температуры и влажности в воздухе, воде, почве и других средах. Мониторинг исследуемой территории (рис.1-б) показал увеличение объемной активности α -излучения радона почвенном слое, что может быть связана с деформациями, происходящими в земной коре и потоком излучения в зоне возможных разломов в данный период времени.

Список литературы

1. Раджапов С.А., Рахимов Р.Х., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. //Computational Nanotechnology// 2020, Т.7, № 2, с.21-28. DOI:10.33693/2313-223X-2020-7-2-21-28
2. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Лутпуллаев С.А. и др. Устройство для измерения объемной активности радона в воздухе. Патент UZ IAP 04882, 8 G 01 T1/00, G 01 T5/00, IAP 2011 0085 (09.03.2011).

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ОБРАЗЦА БОКСИТА

Рассмотрены основные методы элементного анализа горной породы боксита, а также проведено теоретическое обоснование методики нейтронно-активационного анализа. В результате был смоделирован спектр гамма-излучения, возникающего после облучения горной породы нейтронами с энергией 14 МэВ от портативного нейтронного генератора.

O.V. CHAKILEV, E.V. RYABEVA, R.F. IBRAGIMOV

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

MODELING OF NEUTRON ACTIVATION METHOD OF BAUXITE SAMPLE ANALYSIS

The main methods of elemental analysis of bauxite rock are considered, as well as the theoretical justification of the neutron activation analysis technique is carried out. As a result, the spectrum of gamma radiation that occurs after irradiation of a rock with neutrons with an energy of 14 MeV from a portable neutron generator was simulated.

Идентификация элементов в боксите, данные об их концентрациях и распределении необходимы для описания характеристик руды разных минералогических типов и разных месторождений. В данной работе проведен обзор имеющихся методов элементного анализа кернов, а также данные экспериментального подтверждения целесообразности использования НАА для анализа бокситов. [1] Сравнение с другими методами показывает превосходство НАА с использованием изотопных источников [2] и портативных нейтронных генераторов [3] для определения концентраций различных элементов в породе.

Главными бокситообразующими оксидами являются Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , поэтому целью данной работы был расчет процентного содержания перечисленных соединений. Основываясь на исходных данных о содержании оксидов [4], была посчитана массовая доля каждого элемента и затем процентное содержание каждого изотопа в породе. Исходя из данных о сечениях ядерных реакций распада активированных изотопов [5] был построен линейчатый спектр относительной наведенной активности горной породы боксита при облучении нейтронами с энергией 14 МэВ с плотностью потока 5×10^7 н/с в течение 30 мин. Далее был смоделирован отклик гамма-спектрометра ОЧГ на построенные линии, которые были аппроксимированы кривой Гаусса с параметром, соответствующим разрешению 1%. Благодаря такому высокому разрешению появляется возможность разделения линий близких энергий (например, линии Al^{27} - 834 кэВ и Fe^{56} - 846 кэВ). Затем оценено процентное содержание Al_2O_3 , Fe_2O_3 и SiO_2 . Погрешности определения процентного содержания в первую очередь связаны с определением площади пика каждого элемента на аппаратном спектре и зависят от плотности потока активирующих нейтронов.

Полученные данные о содержании оксидов исходя из смоделированного спектра относительной наведенной активности образца горной породы боксита представлены в таблице.

Таблица. Процентное содержание оксидов, полученное исходя из смоделированного спектра

Оксид	Оцененное процентное содержание, %	Тестовое процентное содержание, %
Al_2O_3	73±23	50
Fe_2O_3	16±9	25
SiO_2	11±1	15

В образце был обнаружен оксид алюминия в диапазоне 50-96%. Полученные результаты не противоречат заданным, следовательно, созданная модель спектра близка к реальности. Тестовый образец бокситовой глины считается привлекательным для последующей разработки, когда концентрация Al_2O_3 составляет более 40%. Таким образом, нейтронно-активационный метод может быть использован для определения месторождений, требующих дальнейшей разведки и определения содержания Al_2O_3 в образцах бокситовой горной породы.

Список литературы

1. Ochsенkühn-Petropoulou M.Th., Ochsенkühn K., Luck J. //Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 46, 51-65, 1991
2. Idris Y., Funtua I.I., Umar I.M., Elegba S.B. // J. Applied Radiation and Isotopes, 49, 41-42, 1998
3. Beurton G., Ledru B., Letourneur P. // Applications of Nuclear Techniques: Neutrons and their Applications, 1995
4. Перепелицын В.А., Кормина И.В., Карпец П.А. // "Новые огнеупоры", № 8-2005
5. Бланков Е.Б., Бланкова Т.Н., Русяев В.Г. и др. Нейтронный активационный анализ в геологии и геофизике. - Москва: Наука, 1972.

М.В.ШАНДРИКОВ, А.А.ЧЕРКАСОВ

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

ПЛАНАРНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД С ЦЕНТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

Исследована планарная магнетронная разрядная система с центральной инжекцией электронов. Для увеличения эффективности центральной инжекции электронов был использован электрод-отражатель с отрицательным электрическим потенциалом, размещенный на оси системы. Исследовано влияние отражающего электрода на характеристики магнетронного разряда в зависимости от его геометрической формы, площади поперечного сечения, величины электрического смещения и расстояния до мишени. Показано, что совместное использование принципа центральной инжекции электронов с ускорением их в катодном слое магнетронного разряда и дополнительного отражающего электрода конусной формы позволяет увеличить ток, либо снизить предельное рабочее давление при фиксированном напряжении горения магнетронного разряда.

M.V.SHANDRIKOV, A.A.CHERKASOV

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

PLANAR MAGNETRON DISCHARGE WITH CENTRAL ELECTRON INJECTION

A planar magnetron discharge system with central electron injection has been investigated. To increase the efficiency of the central electron injection, a negative potential reflector electrode placed on the axis of the system was used. The influence of a reflecting electrode on the characteristics of a magnetron discharge depending on its geometric shape, cross-sectional area, magnitude of electric displacement and distance to the target is investigated. It is shown that the combined use of the principle of central injection of electrons with their acceleration in the cathode layer of a magnetron discharge and an additional cone-shaped reflecting electrode allows increasing the current or reducing the operating pressure at a given burning voltage of magnetron discharge.

Снижение давления рабочего газа в процессе магнетронного осаждения при сохранении мощности разряда актуально в связи с уменьшением потерь расплывших атомов в пространстве дрейфа и сохранением их средней энергии, а также уменьшения потока атомов газа на подложку в процессе осаждения и улучшения качества пленок. Использование метода инжекции электронов из дополнительного разряда, расположенного с обратной стороны мишени магнетрона, с последующим ускорением их в катодном слое магнетрона фактически эквивалентно увеличению эмиссионной способности катода-мишени, что существенным образом изменяет характеристики разряда. В разрядной системе с центральной инжекцией электроны входят в область магнетронного разряда вдоль силовых линий магнитного поля, что не требует дополнительных энергетических затрат. Использование специального электрода-отражателя, установленного на оси разрядной системы, препятствует уходу инжектированных электронов по центральным силовым линиям магнитного поля за пределы зоны ионизации. Проведенные эксперименты показали, что при прочих равных условиях, таких как рабочее давление, напряжение горения разряда, расстояние до мишени, электрический потенциал отражающего электрода, наилучшие условия ионизации, и соответственно, достижение максимального значения разрядного тока планарного магнетрона при постоянном напряжении горения разряда обеспечивается отражающим электродом конусной формы, находящимся под потенциалом мишени.

Показано, что инжекция электронов в разрядный промежуток импульсного планарного магнетрона ожидаемо оказывает влияние на сокращение фронта импульса тока разряда. Дополнительное использование электрода-отражателя заметно усиливает этот эффект. Инжекция электронов обеспечивает устойчивое функционирование разряда в области предельно низких давлений, а использование электрода-отражателя обеспечивает сохранение высокой доли металлических ионов в разрядной плазме в условиях, в которых существование самостоятельной формы магнетронного разряда не реализуется.

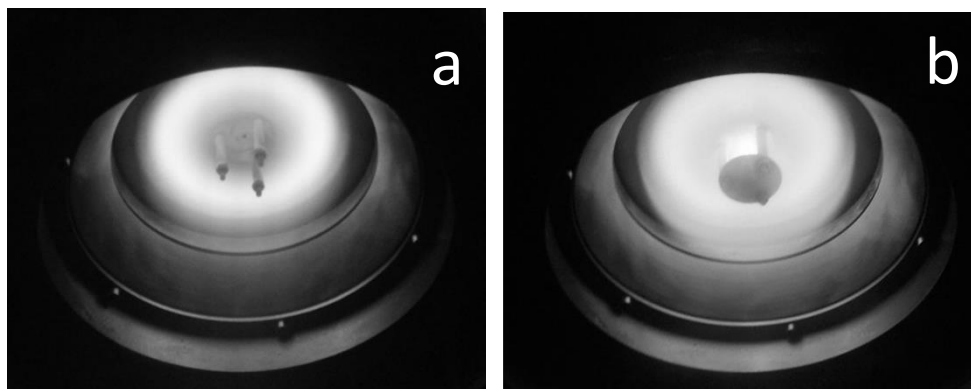


Рис. 1. Фотографии свечения плазмы магнетронного разряда с инжекцией электронов и отражателем: а - рабочее давление 1.5 мТорр, без инжекции и электрода-отражателя; б - 0.5 мТорр, с инжекцией и отражателем. $I = 2$ А, $\tau = 150$ мкс, $f = 1$ кГц.

**Секция
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

Руководитель секций

– д.ф.-м.н., профессор Попруженко
Сергей Васильевич

Секретарь секций

– д.ф.-м.н., профессор Городничев
Евгений Евгеньевич

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9377

E-mail: gorodn@theor.mephi.ru

МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГИГАНТСКОГО МОНОПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА В ^{48}Ca

В приближении случайных фаз с взаимодействием Скирма SLy5 изучается влияние связи между одно-, двух- и трех-фононными компонентами волновых функций на спектр монопольных возбуждений в дважды магическом ядре ^{48}Ca . Показано, что взаимодействие со сложными конфигурациями приводят к перераспределению силы монопольных возбуждений в область низких и высоких энергий возбуждения и улучшает описание экспериментальных данных. Проанализированы свойства низкоэнергетических двух-фононных монопольных возбуждений.

N.N. ARSENYEV, A.P. SEVERYUKHIN
Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics JINR, Dubna, Russia

MICROSCOPIC DESCRIPTION OF ISOSCALAR GIANT MONOPOLE RESONANCE IN ^{48}Ca

Starting from the random phase approximation based on the Skyrme interaction SLy5, we study the effects of the coupling of one-, two-, and three-phonon terms in the wave functions on the monopole strength distributions of double-magic nucleus ^{48}Ca . Using the same set of parameters, we describe available experimental data. The effects of the phonon-phonon coupling leads to a redistribution of the main monopole strength to lower energy states and also to higher energy tail. We analyze thoroughly the properties of the low-energy 0^+ spectrum of two-phonon excitations.

Изучение изоскалярного гигантского монопольного резонанса (ГМР) давно является предметом теоретических и экспериментальных исследований [1,2]. В настоящее время всесторонний анализ ГМР является важной задачей не только с точки зрения структуры ядра [2,3], но и из-за особой роли, которую он играет при описании многих астрофизических процессов, таких как взрыв сверхновых [4] или эволюция нейтронных звезд [5]. Одним из популярных подходов описания ГМР является квазичастичное приближение случайных фаз, с самосогласованным средним полем, полученным с эффективными силами Скирма [2,3]. Изучение распределения монопольной силы в области гигантского резонанса, предполагает учет связи простых частично-дырочных конфигураций с более сложными (двух- и трех-фононными) конфигурациями [6,7]. Это делает необходимым расчет в большом конфигурационном пространстве. Сепарабельзация остаточного взаимодействия Скирма позволяет обойти эту трудность и проводить вычисления независимо от конфигурационного пространства [8,9]. Такие расчеты не требуют введения новых параметров.

В данном докладе мы анализируем влияние связи между одно-, двух- и трех-фононными компонентами волновых функций на распределение монопольной силы в дважды магическом ядре ^{48}Ca . Используя один набор параметров сил Скирма, мы описываем имеющиеся экспериментальные данные [10,11]. Учет сложных конфигураций приводят к перераспределению основной силы монопольных возбуждений как в область низких, так и область высоких энергий возбуждения [12].

Список литературы

1. Blaizot J.P. // *Phys. Rep.* 1980. Vol. 64. P. 171–248.
2. Garg U., Colò G., *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2018. Vol. 101. P. 55–95.
3. Arsenyev N.N., Severyukhin A.P. // *Universe.* 2021. Vol. 7, P. 145.
4. Bethe H.A. // *Rev. Mod. Phys.* 1990. Vol. 62. P. 801–866.
5. Glendenning N.K. // *Phys. Rev. Lett.* 1986. Vol. 57. P. 1120–1123.
6. Soloviev V.G. *Theory of Atomic Nuclei: Quasiparticles and Phonons.* 1992. Bristol/Philadelphia.
7. Severyukhin A.P., Arsenyev N.N., Pietralla N. // *Phys. Rev. C.* 2021. Vol. 104. P. 024310
8. Giai N.V., Stoyanov Ch., Voronov V.V. // *Phys. Rev. C.* 1998. Vol. 57. P. 1204–1209.
9. Severyukhin A.P., Voronov V.V., Giai N.V. // *Eur. Phys. Jour. A.* 2004. Vol. 22. P. 397–403.
10. Howard K., Garg U., Itoh M., Akimune H., Bagchi S., Doi T., Fujikawa Y., Fujiwara M., Furuno T., Harakeh M., Hijikata Y., Inaba K., Ishida S., Kalantar-Nayestanaki N., Kawabata T., Kawashima S., Kitamura K., Kobayashi N., Matsuda Y., Nakagawa A., Nakamura S., Nosaka K., Okamoto S., Ota S., Weyhmler S., Yang Z. // *Phys. Lett. B.* 2020. Vol. 801. P. 135185.
11. Olorunfunmi S.D., Neveling R., Carter J., von Neumann-Cosel P., Usman I.T., Adsley P., Bahini A., Baloyi L.P.L., Brümmer W., Donaldson L.M., Jivan H., Kheswa N.Y., Li K.C.W., Marín-Lámbarri D.J., Molema P.T., Moodley C.S., O'Neill G.G., Papka P., Pellegrini L., Pseudo V., Sideras-Haddad E., Smit F.D., Steyn G.F., Aava A.A., Diel F., Dunkel F., Jones P., Karayonchev V. // *arXiv:2202.00722v1 [nucl-ex]* 1 Feb 2022.
12. Arsenyev N.N., Severyukhin A.P. // *in preparation.*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВАКУУМА

Исследована зависимость числа сигнальных фотонов, излучаемых при вынужденном фотон-фотонном рассеянии трех фокусированных лазерных импульсов, от их пространственной фокусировки, применительно к установке XCELS.

A.V. BEREZIN¹, A.M. FEDOTOV¹

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

INVESTIGATION OF NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF THE VACUUM

The dependence of the number of signal photons emitted upon stimulated photon-photon scattering of three focused laser pulses on their spatial focusing has been studied as applied to the XCELS facility.

Эффект поляризации вакуума является одним из важнейших предсказаний квантовой теории поля. С его учётом эффективный лагранжиан электромагнитного поля [1] принимает вид

$$L_{eff} = \frac{1}{4\pi} F + L_{1-loop}(F, G) + O(\alpha^2),$$

$$L_{1-loop} = \alpha \left\{ \frac{4F^2 + 7G^2}{360\pi^2 E_S^2} + \frac{F(8F^2 + 13G^2)}{630\pi^2 E_S^4} + \dots \right\}, \quad \omega \ll m,$$

где $F = (E^2 - H^2)/2$, $G = \vec{E}\vec{H}$ - инварианты электромагнитного поля, α - постоянная тонкой структуры, E_S - критическое поле, ω - характерная частота поля, m - масса электрона. Дополнительные по сравнению с классической теорией слагаемые в лагранжиане приводят к нелинейным поправкам в уравнениях Максвелла, которые можно интерпретировать как поляризацию и намагниченность вакуума. В связи с этим предсказывается ряд потенциально наблюдаемых квантовых эффектов, одним из которых является вынужденное рассеяние фотонов.

Нами разработан код для численного расчёта количества сигнальных фотонов в процессе взаимодействия нескольких произвольно заданных фокусированных импульсов. За основу взята одна из известных схем столкновения [2], в которой сталкиваются три перпендикулярных импульса, один из которых является второй субгармоникой двух других. При этом сигнал четко отделен от изначальных импульсов по направлению и частоте (рис. 1). В случае использования такой схемы на конкретной экспериментальной установке, одними из немногих свободных параметров будут являться радиусы фокусировки импульсов, что делает исследование такой параметрической зависимости наиболее интересным для планирования эксперимента. С помощью разработанного кода исследована зависимость числа излучаемых сигнальных фотонов от параметров фокусировки импульсов Δ . Расчёты сделаны применительно к российской установке XCELS [3].

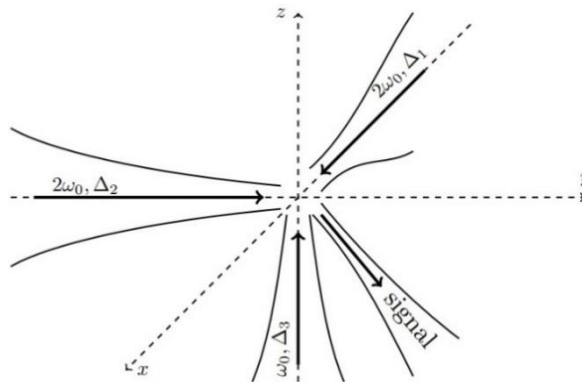


Рис. 1. Схема столкновения фокусированных импульсов для детектирования фотон-фотонного взаимодействия

Список литературы

1. Heisenberg W., Euler H. // Zeitschrift für Physik. 1936. V. 98, №. 11. P. 714.
2. Lundström E. et al. // Physical review letters. 2006. V. 96, №. 8. P. 083602.
3. <https://www.ipfran.ru/scientific-activity/xceles-project>

В.И. БОНДАРЕНКО¹, М.Г. УРИН²

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

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

СВОЙСТВА ГАМОВ-ТЕЛЛЕРОВСКОГО И ЗАРЯДОВООБМЕННЫХ ГИГАНТСКИХ СПИН-МОНОПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ МАГИЧЕСКИХ МАТЕРИНСКИХ ЯДРАХ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Базовая версия полумикроскопической частично-дырочной дисперсионной оптической модели адаптирована и применена к описанию основных свойств Гамов-Теллеровского и зарядовообменных гигантских спин-монопольных резонансов в среднетяжелых магических материнских ядрах. Результаты расчетов, полученные для ядер ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{132}Sn и ^{208}Pb , сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

V.I. BONDARENKO¹, M.H. URIN²

¹Shubnikov Institute of Crystallography, Federal Research Center “Crystallography and Photonics,” Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

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

PROPERTIES OF GAMOW-TELLER AND CHARGE-EXCHANGE GIANT SPIN-MONOPOLE RESONANCES IN MEDIUM-HEAVY CLOSED-SHELL PARENT NUCLEI: A SEMI-MICROSCOPIC DESCRIPTION

The basic version of the semi-microscopic particle-hole dispersive optical model is adopted and implemented to describe main properties of the Gamow-Teller and charge-exchange giant spin-monopole resonances in medium-heavy closed-shell parent nuclei. Calculation results obtained for ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{132}Sn and ^{208}Pb are compared with available experimental data.

Свойства гигантских резонансов (ГР), ассоциированных с высокоэнергетическими возбуждениями типа частица-дырка (ч-д), описываются рядом характеристик и параметров. К основным характеристикам относятся усредненные по энергии силовая функция и «процессированная» переходная плотность, отвечающие подходящему одночастичному внешнему полю (пробному оператору), а также вероятности прямого однонуклонного распада. В свою очередь, силовая функция определяет такие параметры, как энергия максимума ГР и (или) центроид энергии, полная ширина и (или) среднеквадратичная дисперсия энергии, доля исчерпывания соответствующего правила сумм для заданного энергетического интервала. Переходная плотность используется в анализе сечений ядерных реакций, сопровождающихся возбуждением изучаемого ГР.

В данной работе представлено теоретическое исследование основных свойств изовекторных 1^+ -ГР, отвечающих зарядовообменным (изовекторным) спин-монопольным ч-д возбуждениям среднетяжелых магических ядер. К указанным ГР относятся Гамов-Теллеровский резонанс (ГТР), а также гигантские спин-монопольные ГР в $\beta^{(\mp)}$ -

каналах (ИВГСМР^(\mp)). Исследование предпринято в рамках полумикроскопической частично-дырочной

дисперсионной оптической модели (ЧДДОМ), в которой совместно учитываются основные моды релаксации ч-д возбуждений, ассоциированных с ГР. К указанным модам относятся затухание Ландау, связь ч-д возбуждений с одночастичным континуумом и многоквaziчастичными конфигурациями (фрагментационный эффект). По существу, ЧДДОМ является обобщением стандартной и нестандартной версий континуумного приближения случайной фазы на случай учета (феноменологически и в среднем по энергии) фрагментационного эффекта. В применении к среднетяжелым магическим ядрам формулировку ЧДДОМ и приложение модели к описанию ряда изоскалярных и изовекторных ГР можно найти, например, в [1] и содержащихся в этой работе ссылках.

В представленной работе ЧДДОМ адаптирована и применена к описанию основных характеристик и параметров ГТР и ИВГСМР^(\mp) в материнских ядрах ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{132}Sn и ^{208}Pb . Результаты расчетов сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. Основные результаты исследования содержатся в [2].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №19-02-00660) и Программы «Приоритет 20-30» НИЯУ МИФИ.

Список литературы.

1. M. L. Gorelik S. Shlomo B. A. Tulupov and M. H. Urin, // Phys. Rev. C **103**, 034302 (2021);
2. V.I. Bondarenko, M.G. Urin // arXiv:2201-02965 [nucl-th].

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЦИРКУЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С ТОНКОЙ ФОЛЬГОЙ

В работе рассмотрена задача генерации вторичного излучения электронами, которые не смогли преодолеть потенциальный барьер, который возник вследствие разделения заряда при взаимодействии короткого лазерного импульса с тонкой мишенью. Такие частицы под действием кулоновской силы возвращаются в мишень и рециркулируют. Было проведено трехмерное численное PIC-моделирование взаимодействия 15фс лазерного импульса с фольгой толщиной 120 нм. С использованием траекторий рециркулирующих частиц, полученных из численных расчетов, были рассчитаны спектры вторичного излучения, а также угловое распределение излучаемой энергии.

O.E. VAIS, M.G. LOBOK¹, V.YU. BYCHENKOV¹

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

GENERATION OF SECONDARY RADIATION BY RECIRCULATING ELECTRONS DURING LASER INTERACTION WITH THIN FOIL

The work is devoted to the problem of generating secondary radiation by electrons, which don't overcome the potential barrier that is as a result of charge separation during the interaction of a short laser pulse with thin target. Such particles return to the target and recirculate because of the impact of the Coulomb force. 3D PIC-simulation of the interaction of a 15fs laser pulse with a 120 nm foil has been performed. Using the trajectories of recirculating particles, which were obtained from numerical simulations, the spectra of secondary radiation, as well as the angular distribution of the emitted energy, have been calculated.

При взаимодействии лазерного импульса с мишенью электроны, чьей энергии оказывается не достаточно для преодоления потенциального барьера мишени, возвращаются к мишени и рециркулируют. В зависимости от соотношения ее параметров, таких как плотность и толщина, и параметров лазерного импульса, таких как интенсивность и длительность, может наблюдаться рециркуляция частиц как с передней [1], так и с задней поверхности мишени [2]. Хотя такие частицы имеют сравнительно небольшую энергию, они могут играть важную роль в лазерно-плазменных взаимодействиях, а также участвовать в генерации тормозного излучения внутри самой мишени и синхротронного излучения при возвращении к ее поверхности [3, 4].

В работе было проведено исследование вторичного излучения электронов, испытывающих рециркуляцию в результате взаимодействия линейно поляризованного лазерного импульса (пятно фокусировки диаметром 8 мкм, длительность 15 фс, интенсивность $I_L = 5.3 \times 10^{19}$ Вт/см², для длины волны лазерного излучения 0.8 мкм, что отвечает энергии 600 мДж) с плотной плазменной мишенью толщиной 0.12 мкм и плотностью $130 n_c$, где n_c – критическая плотность плазмы, равная 1.7×10^{21} см⁻³. Расчет взаимодействия проводился при помощи трехмерного PIC-моделирования. При рассматриваемом соотношении лазерно-плазменных параметров рециркуляция электронов наблюдалась как с задней, так и с передней поверхностей мишени.

Траектории частиц, полученные в численном моделировании, были использованы для расчета спектрально-угловых распределений вторичного излучения. Спектры излучения, генерируемого рециркулирующими электронами, рассчитывалось на основе запаздывающих потенциалов, которые были преобразованы в хорошо известные соотношения для спектральной плотности мощности, излучаемой в единицу спектрального диапазона и единицу телесного угла:

$$\frac{d^2 I}{d\Omega d\omega} = \frac{e^2}{4\pi^2 c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mathbf{n} \times [(\mathbf{n} - \boldsymbol{\beta}) \times \dot{\boldsymbol{\beta}}]}{(1 - \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{n})^2} e^{i\omega(t - \mathbf{n} \cdot \mathbf{r}(t)/c)} dt \right|^2,$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор электрона, $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v}/c$ – безразмерная скорость частицы, \mathbf{n} – единичный вектор, указывающий направление наблюдения.

В ходе проведенного исследования было показано, что электроны рециркулируют как на задней, так и на передней поверхности мишени. Максимальные энергии таких частиц достигают 100 кэВ, а вторичное излучение, генерируемое под углом 90 градусов к направлению распространения лазерного импульса, отвечает ультрафиолетовому и мягкому рентгеновскому диапазону.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00023.

Список литературы

1. Martinez B., d'Humières E., Gremillet L. // Phys. Rev. Research. 2020. V. 2. P. 043341.
2. Mackinnon A. J., Sentoku Y., Patel P. K., et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 215006.
3. Compant La Fontaine A., Courtois C., Lefebvre E. et al. // Physics of Plasmas. 2013. V. 20. P. 123111.
4. Wan F., Lv C., Jia M., Sang H., Xie B. // Eur. Phys. J. D. 2017. V. 71. P. 236.

ДИНАМИКА ПОЛЯРИТОННОГО ДВОЙНОГО БЛОХОВСКОГО ПУЧКА

В работе исследуется сверхбыстрое движение вихря с двойным топологическим зарядом в открытой экситон-поляритонной системе. Создаваемая топология охватывает все возможные поляритонные псевдоспины, причем каждое состояние появляется в реальном пространстве дважды благодаря конформному отображению поляритонной блоховской сферы на плоскость с сохранением ортогональности между линиями метрики. Работа поддержана совместным с CNR проектом РФФИ № 20–52–7816.

N.S. VORONOVA, L. DOMINICI², D. SANVITTO²

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

² CNR NANOTEC, Lecce, Italy

DYNAMICS OF THE POLARITON DOUBLE FULL-BLOCH BEAM

We study the ultrafast motion a doubly-charged vortex in an open-dissipative exciton-polariton fluid. The created topology comprises all the possible polariton pseudospins, with each state appearing twice in real space thanks to the conformal mapping of the polariton Bloch sphere to the plane, with the orthogonality between the parallels and meridians being preserved.

Экситонные поляритоны в микрорезонаторе – гибридные моды света и вещества, возникающие в результате сильной связи фотонов в резонаторе и экситонов в квантовых ямах. Открыто-диссипативная природа поляритонов позволяет как резонансное возбуждение с помощью непрерывного или импульсного лазерного излучения, так и определение их состояния по испускаемому из резонатора свету.

В представленной работе исследуется временная эволюция двойного полного блоховского пучка, созданного в результате оптического возбуждения при помощи лазерного пучка с многократным топологическим зарядом (или набором одинарных вихрей), что приводит к эффекту вихря, движущегося по спирали. Двойной вихрь привносится в поляритонную систему лазерным импульсом, после чего следует второй (безвихревой) импульс для достижения требуемого начального состояния. Наблюдаемая после этого динамика является результатом естественных свойств поляритонов, таких как их Раби-осцилляции и разница в скоростях распада двух нормальных мод (верхней и нижней поляритонных мод). Фактически, движение наблюдаемых фотонных вихрей может быть приписано пространственно изменяющейся относительной фазе между нормальными модами (см. рис. 1a) и их биениям во времени из-за различных частот. Самое важное, что эта основная текстура и ее динамика могут быть описаны в терминах псевдоспина поляритонного состояния, отображаемого метрикой сферы Блоха в реальном пространстве (рис. 1b). Это дает возможность создавать и изучать нетривиальную топологию, представляющую асимметричный, но конформный двойной полный блоховский пучок и его эволюцию во времени, которая показана на рис. 1c.

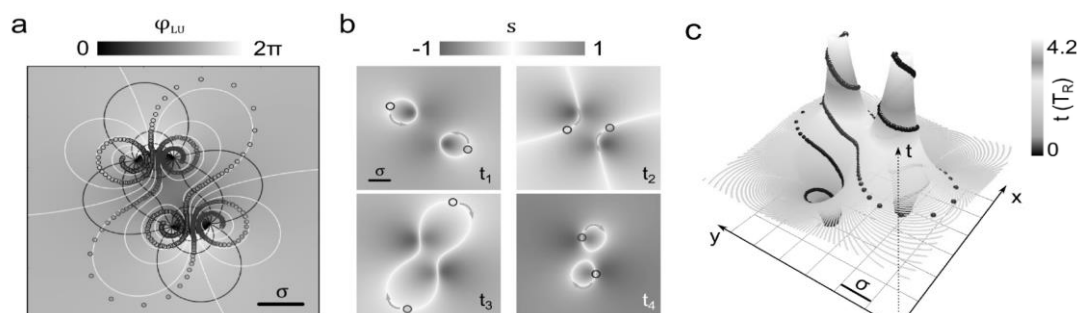


Рис. 1. (a) Профиль относительной фазы φ_{LU} в случае начальных условий с большей популяцией верхних поляритонов. Траектория коров вихрей в фотонной компоненте отмечена кружочками. Черные сплошные линии – линии постоянной относительной фазы, белые сплошные линии – линии постоянного дисбаланса популяций. (b) Карты дисбаланса популяций $s(x, y)$ в разные моменты времени. Мгновенные траектории коров фотонных вихрей следуют за белыми контурными линиями ($s = 0$), при этом движение двух вихрей схематически обозначено красным и синим кружками. (c) Эволюция линии $s = 0$ во времени на трехмерной поверхности с двумя долинами и двумя холмами.

Список литературы

1. L. Dominici, D. Colas, A. Gianfrate *et al.*, Phys. Rev. Res. **3**, 013007 (2021).
2. L. Dominici, N. Voronova, D. Colas *et al.*, Opt. Expr. **29**(23), 37262 (2021).
3. L. Dominici, N. Voronova, A. Rahmani *et al.*, DOI:10.21203/rs.3.rs-1319176/v1 (2022).

ОБРАТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ ПУЧКОВ С НАКЛОННЫМ ФРОНТОМ

Рассмотрен процесс обратного комптоновского рассеяния лазерного импульса на релятивистском электронном сгустке. В приближении, описывающем форму сталкивающихся сгустков 3-D гауссианами, фронты которых наклонены относительно направления распространения (так называемая "crab-crossing scheme"), найдено аналитическое выражение для светимости процесса ОКР. Определены оптимальные углы наклона фронтов, реализующих максимальную светимость.

D.V. GAVRILENKO¹, A.P. POTYLITSYN², A.A. TISHCHENKO¹

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

² National Research Tomsk Polytechnic University, Russia

INVERSE COMPTON SCATTERING OF BEAMS WITH TILTED FRONTS

The process of inverse Compton scattering of a laser pulse on a relativistic electron bunch is considered. Using an approximation describing the shape of the colliding bunch by 3-D Gaussians with fronts tilted relatively the propagation direction (the so-called "crab-crossing scheme"), an analytical expression for the luminosity of the ICS process is obtained. The optimum angles of fronts tilting are determined to achieve maximal luminosity.

Одним из перспективных методов генерации монохроматического рентгеновского излучения является процесс обратного комптоновского рассеяния (ОКР) лазерных фотонов на пучке умеренно релятивистских электронов [1, 2].

В работе [1] предложено использовать в процессе ОКР лазерный импульс с наклонным фронтом, чтобы увеличить эффективную длину взаимодействия электронов и фотонов при соответствующем подборе геометрии столкновений. В этой работе, а также в последующей [2], рассмотрено рассеяние лазерного импульса с наклонным фронтом на симметричном электронном сгустке в рамках классической электродинамики для неколлинеарной геометрии.

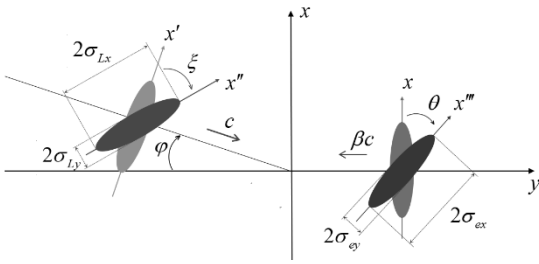


Рис. 1. Геометрия процесса ОКР

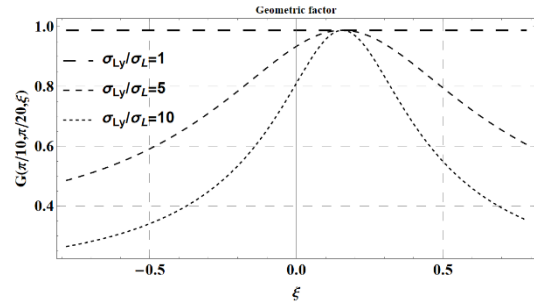


Рис. 2. Зависимость геометрического фактора от угла наклона лазерного фронта

Мы рассмотрели процесс ОКР в такой геометрии (рис. 1) в рамках квантовой электродинамики. В таком подходе характеристики рассеянного излучения вычисляются на основе сечения процесса и светимости:

$N_{ph} = N_L N_e \sigma L$, $L = c(1 + \beta \cos \varphi) \int dx dy dz dt F_L(x, y - ct, z) F_e(x, y + \beta ct, z)$,

где $F_L(x, y - ct, z)$, $F_e(x, y + \beta ct, z)$ – нормированные распределения лазерного и электронных сгустков. Найдено аналитическое выражение для светимости

$$L(\varphi, \theta, \xi) = \left\{ 2\pi \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_L^2} \sqrt{f_e(\varphi, \theta) + f_L(\varphi, \xi)} \right\}^{-1},$$

$$f_e(\varphi, \theta) = \sigma_{e_x}^2 \left[\frac{\beta \cos \theta + \cos(\varphi - \theta)}{1 + \beta \cos \varphi} \right]^2 + \sigma_{e_y}^2 \left[\frac{\beta \sin \theta - \sin(\varphi - \theta)}{1 + \beta \cos \varphi} \right]^2$$

$$f_L(\xi, \varphi) = \sigma_{L_x}^2 \left[\frac{\cos \xi + \beta \cos(\varphi + \xi)}{1 + \beta \cos \varphi} \right]^2 + \sigma_{L_y}^2 \left[\frac{\sin(-\xi) - \beta \sin(\varphi + \xi)}{1 + \beta \cos \varphi} \right]^2$$

а также оптимальные углы наклона θ и ξ , реализующие максимум светимости. Работа поддержана РФФИ, грант 19-29-12036 (численное моделирование), и Министерством науки и образования РФ, соглашение 075-15-2021-1361.

Список литературы

1. A. D. Debus, M. Bussmann, M. Siebold et al // Appl. Phys. B 100(1), 61 (2010).
2. K. Steiniger, D. Albach, M. Bussmann et al // Frontiers in Physics, 6, article 155 (2019)

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРО-КАПЕЛЬНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ КОНВЕРСИИ ВО ВЗРЫВНО-УСКОРЕННЫЕ ИОНЫ.

Исследован лазерный нагрев суб-микро-капельной среды под действием релятивистски интенсивного лазерного излучения фемтосекундной длительности. Оптимизированы параметры мишени с целью увеличения как числа горячих электронов, взрывно-ускоренных дейтронов, так и для достижения максимальной конверсии лазерного излучения в их энергию.

D.A. GOZHEV, S.G. BOCHKAREV, M.G. LOBOK, A.V. BRANTOV, V.YU. BYCHENKOV

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

The laser heating of a sub-micro-droplet medium under the action of relativistically intense femtosecond laser radiation has been studied. The target parameters are optimized in order to increase both the number of hot electrons and explosively accelerated deuterons and to achieve the maximum conversion of laser radiation into their energy.

Современные исследования показали, что использование различных микро- и нано-структурированных мишеней при лазерно-плазменном взаимодействии может существенно повысить выход электронов и ионов, вторичного электромагнитного излучения, а также D-D термоядерных нейтронов [1]. Одним из примеров таких мишеней, является микро-капельная (микро-кластерная) среда. Объемный нагрев таких мишеней позволяет более эффективно преобразовывать энергию лазерного излучения во взрывно-ускоренные ионы по сравнению со случаем использования обычных твердотельных фольг или газовых мишеней за счет того, что предлагаемые мишени обладают с одной стороны высокой прозрачностью, а с другой стороны высокой средней плотностью.

В данной работе, являющейся продолжением работы [2], с помощью кода MANDOR было выполнено 3D PIC моделирование взаимодействия фемтосекундного релятивистски интенсивного лазерного излучения ($I = 2 \times 10^{18}$ Вт/см²) с кластерной плазмой суб-микронного размера. В расчетах лазерный импульс моделировался в плосковолновом приближении, а размер характерный расчетной области значительно меньше диаметра пятна фокусировки. Продемонстрировано оптимизирование параметров кластерной мишени с целью увеличения числа быстрых ионов и увеличение конверсии энергии лазерного излучения в энергию этих частиц. Также была проведена оценка выхода термоядерных нейтронов при DD реакциях, происходящих после облучения лазером капель тяжелой воды.

В исследование было показано, что конверсия энергии лазерного излучения в энергию быстрых ионов (с энергией выше 100 кэВ) в оптимальном случае достигает 12%, а число таких дейтронов превышает 10^{12} шт. при диаметре кластера из тяжелой воды $d = 0.15\lambda$ и средней плотности дейтронов 10^{19} см⁻³. Здесь λ – длина волны лазерного излучения, $\lambda = 1$ мкм. Проведенные оценки выхода DD нейтронов за один импульс 1 Дж лазера дают $\sim 10^7$ нейтр./Дж в полный телесный угол. Полученные значения предсказывают выход по крайней мере, не ниже соответствующего значения выхода для дейтерированных микронитей [1], существенно более сложных для практического применения. Ожидаемая пиковая яркость компактного лазерного источника нейтронного составляет $\sim 10^{16}$ нейтр./(см² с). Конверсия энергии лазерного излучения в энергию нейтронов для рассмотренного в статье случая $\sim 5 \cdot 10^{-6}$. Современные исследования по генерации нейтронов за счет фотоядерных реакций, инициируемых мощными лазерными импульсами, вообще говоря, показывают более высокую конверсию в энергию нейтронов, порядка 10^{-4} [3] за выстрел. Однако, для получения такой высокой конверсии требуются лазерные системы с мульти-джоульной энергией, которые ещё недостаточно распространены и поэтому нельзя считать, что получение нейтронов с помощью данной схемы является рутинной процедурой. Схема получения D-D нейтронов в микрокапельной среде значительно более проста и предъявляет гораздо меньшие требования на энергию лазера, так как появляется возможность применять относительно компактные системы с энергией до 1 Дж.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00023.

Список литературы

1. A. Curtis, C. Calvi, J. Tinsley, R. Hollinger, V. Kaymak, A. Pukhov, S. Wang, A. Rockwood, Y. Wang, V.N. Shlyaptsev and J.J. Rocca, Nature Comm., 9, 1077 (2018)
2. D.A. Gozhev, S.G. Bochkarev and V.Yu. Bychenkov, JETP Letters, 114, 200 (2021).
3. M.G. Lobok, A.V. Brantov, and V.Yu. Bychenkov.. Phys. Plasmas, 26, 123107 (2019).

М.Л. ГОРЕЛИК¹, М.Г. УРИН²

¹Московская экономическая школа, Москва, Россия

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

ПРЯМОЙ ОДНОНЕЙТРОННЫЙ РАСПАД ИЗОСКАЛЯРНОГО ГИГАНТСКОГО ДИПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА В СРЕДНЕ-ТЯЖЁЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В рамках полумикроскопической частично-дырочной дисперсионной оптической модели предложено описание прямого однонейтронного распада изоскалярного гигантского дипольного резонанса в ядрах ⁹⁰Zr, ¹¹⁶Sn и ²⁰⁸Pb. Результаты расчётов вероятностей распада сравниваются с соответствующими экспериментальными данными.

M.L. GORELIK¹, M.H. URIN²

¹Moscow Economic School, Moscow, Russia

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

DIRECT ONE-NEUTRON DECAY OF THE ISOSCALAR GIANT DIPOLE RESONANCE IN MEDIUM-HEAVY SPHERICAL NUCLEI: A SEMIMICROSCOPIC DESCRIPTION

A description of one-neutron decay of the isoscalar giant dipole resonance in the ⁹⁰Zr, ¹¹⁶Sn, and ²⁰⁸Pb nuclei is proposed within the particle-hole dispersive optical model. Calculation results for decay probabilities are compared with the respective experimental data.

Прямой однонуклонный распад гигантских резонансов (ГР), ассоциированных с высокоэнергетическими ядерными возбуждениями типа частица-дырка, является предметом экспериментальных и теоретических исследований. Эти исследования позволяют сделать заключения о микроскопической структуре и механизмах распада ГР. Экспериментальную информацию получают путём совместного анализа инклюзивного сечения прямой реакции с возбуждением ГР и соответствующего «распадного» сечения (например, в случае возбуждения изоскалярных ГР – сечений (α, α') - и $(\alpha, \alpha'N)$ -реакций). Парциальную вероятность (branching ratio) b_μ прямого однонуклонного распада ГР, сопровождающегося заселением однодырочного состояния μ^{-1} ядра-продукта, определяют через отношение интегралов по энергии возбуждения от соответствующих «распадного» и инклюзивного сечений. Одним из экспериментальных исследований прямого однонуклонного распада ГР является работа [1], в которой изучался прямой однонейтронный распад изоскалярного гигантского дипольного резонанса в ядрах ⁹⁰Zr, ¹¹⁶Sn и ²⁰⁸Pb с помощью (α, α') - и $(\alpha, \alpha'N)$ -реакций. Результаты исследования представлены в терминах вероятностей $b = \sum_\mu b_\mu$, где суммирование ведётся по небольшому числу известных нейтронно-дырочных валентных состояний ядра-продукта. Теоретические предсказания относительно величин b_μ сделаны в работе [2], в которой нестандартная версия континуумного приближения случайной фазы обобщена (в «полюсном» приближении) на случай феноменологического учёта фрагментационного эффекта в формировании ГР. Полученные в [1] значения вероятностей b оказались заметно меньше теоретических величин.

В представленной работе прямой однонейтронный распад изоскалярного гигантского дипольного резонанса в упомянутых ядрах описывается в рамках частично-дырочной дисперсионной оптической модели, в которой фрагментационный эффект в формировании ГР учитывается для произвольной (но достаточно большой) энергии возбуждения. Формулировку модели и приложения к описанию основных свойств различных ГР можно найти в [3] и ссылках в этой работе. Принятое в [2,3] определение парциальных вероятностей b_μ предполагает интегрирование «распадного» и инклюзивного сечений по одинаковому энергетическому интервалу в окрестности изучаемого ГР. В «одноуровневом» приближении такое определение b_μ сводится к отношению соответствующих парциальной и полной ширины ГР. В [1] используется определение b , в котором инклюзивное сечение (в отличие от «распадного» сечения) интегрируется по широкому энергетическому интервалу, отвечающему почти полному исчерпыванию соответствующего энергетически взвешенного правила сумм. Использование в данной работе такого определения позволило заметно приблизить расчётные величины вероятностей b к соответствующим экспериментальным значениям.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №19-02-00660) и Программы «Приоритет 20-30» НИЯУ МИФИ.

Список литературы

1. Hunyadi M., Van den Berg A.M., Davids B., Harakeh M.N. et al. // Phys. Rev. C 2007 V. 75 P. 014606.
2. Gorelik M.L., Safonov I.V., and Urin M.H. // Phys. Rev. C 2004 V. 69 P. 054322.
3. Gorelik M.L., Shlomo S., Tulupov B.A., and Urin M.H. // Phys. Rev. C 2021 V. 103 P. 034302.

ВЛИЯНИЕ ТЕМНЫХ ЭКСИТОНОВ НА СКОРОСТЬ ЗВУКА В ПОЛЯРИТОННЫХ СИСТЕМАХ

Изучено влияние присутствия популяции темных экситонов на спектры боголюбовских возбуждений и скорость звука в бозе-газе экситонных поляритонов в оптическом микрорезонаторе для постоянной и импульсной нерезонансной накачки.

A.A. GRUDININA, I.L. KURBAKOV², N.S. VORONOVA^{1,3}

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

² Institute for Spectroscopy, RAS, Troitsk, Moscow, Russia

³ Russian Quantum Center, Moscow, Russia

DARK EXCITONS EFFECT ON THE BOGOLIUBOV SOUND IN POLARITON SYSTEMS

We analyze the influence of dark excitons population on the Bogoliubov excitations spectra and sound velocity in cavity exciton-polariton Bose gases for different types of non-resonant excitation (pulsed and continuous wave).

Экситонные поляритоны – это квазичастицы, образованные в результате сильной связи фотонной и экситонной мод в оптическом микрорезонаторе, демонстрирующие сверхтекучее поведение. В данной связи ранее были развиты феноменологические модели, учитывающие неравновесную природу экситонных поляритонов и включающие в себя уравнение Гросса-Питаевского для низкоэнергетического конденсата и связанные с ним уравнения для высокоэнергетических резервуаров. В моделях [1,2] высокоэнергетические экситоны делятся на «активный» и «неактивный» резервуары, причем связывается с конденсатом только «активный» резервуар; в работе [3] рассматриваются три резервуара «неактивный», «активный», «темный». В работе [4] было развито равновесное описание поляритонной системы в приближении Хартри-Фока-Боголюбова и показано, что наличие темных экситонов в системе сильно влияет на боголюбовские возбуждения: в частности, на величину химического потенциала и скорость звука в данной системе.

В представленной работе боголюбовские спектры рассматриваются на базе описания, развитого в [4], и рассмотрены две феноменологические модели, учитывающие накачку (импульсную [5] и постоянную [6]) и связывающие плотность темных экситонов и плотность поляритонов в системе. Было показано, что в зависимости от типа накачки отношение плотности темных экситонов к плотности поляритонов будет существенно различаться.

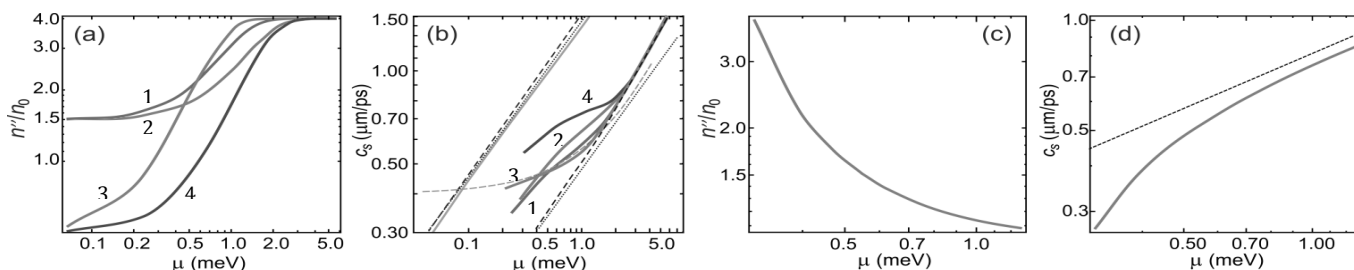


Рис. 1. (a,c) Зависимость отношения плотности темных экситонов n'' к конденсатной плотности n_0 от химического потенциала μ ; (b,d) зависимость скорости звука от μ для нерезонансной импульсной (a,b) и постоянной (c,d) накачки. Разные линии на (b) соответствуют разным видам фитирования экспериментальных данных, представленным на (a); сплошная линия на (d) соответствует фитированию при постоянной накачке (c), пунктир обозначает $c_s^B/3$, где c_s^B – боголюбовская скорость звука.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 21–52–12038 (совместный проект РФФИ-DFG).

Список литературы

1. K. G. Lagoudakis, F. Manni, B. Pietka et al., Phys. Rev. Lett.106, 115301 (2011).
2. M. Pieczarka, M. Syperek, L. Dusanowski et al., Sci Rep 7, 7094 (2017).
3. C. Ant'ón, T. C. H. Liew, G. Tosi et al., Phys. Rev. B 88, 035313 (2013).
4. A. Grudinina, I. Kurbakov, Yu. Lozovik et al., Phys. Rev. B 104, 125301 (2021).
5. E. Estrecho, M. Pieczarka, M. Wurdack et al., Phys. Rev. Lett.126, 075301 (2021).
6. M. Pieczarka, O. Bleu, E. Estrecho, J. Levinsen, and M. M. Parish, arXiv:2112.03768.

ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ РАССЕЯНИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОНА ГЕЛИЕПОДОБНЫМ АТОМНЫМ ИОНОМ

Теоретически предсказаны аналитическая структура, абсолютные величины и угловая анизотропия дважды дифференциального сечения тормозного излучения при рассеянии рентгеновского фотона гелиеподобным атомным ионом.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, O.B. ANDREEVA, R.V. KONEEV

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

BREMSSTRAHLUNG UPON SCATTERING OF AN X-RAY PHOTON BY A HELIUM-LIKE ATOMIC ION

The analytical structure, absolute values, and angular anisotropy of the double differential cross section of bremsstrahlung upon scattering of an X-ray photon by a helium-like atomic ion are theoretically predicted.

В [1] построен нерелятивистский вариант квантовой теории тормозного излучения (ТИ) при резонансном комптоновском рассеянии (КР) рентгеновского фотона атомом. Здесь представлены результаты первого теоретического исследования ТИ при нерезонансном КР рентгеновского фотона гелиоподобным атомным ионом. Амплитуда вероятности ТИ определена произведением амплитуд вероятности процессов поглощения $\eta\omega$ -фотона атомным ионом и излучения тормозного $\eta\omega_c$ -фотона виртуальным xp -электроном сплошного спектра:

$$\eta\omega + [0] \rightarrow 1sxp \rightarrow 1s\epsilon l + \eta\omega_c, \quad l = 0, 2,$$

$$x \in [0; \infty), \quad \epsilon = \eta(\omega - \omega_c) - I_{1s}.$$

В качестве объекта исследования взят гелиоподобный ион атома кремния $[\text{Si}^{12+}$, заряд ядра иона $Z = 14$, конфигурация и терм основного состояния $[0] = 1s^2 [1S_0]$, энергия порога ионизации $1s$ -оболочки $I_{1s} = 2.438$ keV].

Результаты расчета, в частности, для \perp -схемы (векторы поляризации фотонов перпендикулярны плоскости рассеяния) предполагаемого эксперимента представлены на рис. 1. Для энергий падающего на ион фотона $\eta\omega \geq 15$ keV роль ТИ значительно падает и лидирующим становится процесс нерезонансного контактного КР фотона атомным ионом [2,3]:

$$\eta\omega + [0] \rightarrow 1s\epsilon l + \eta\omega_c, \quad l \geq 0.$$

Следует ожидать, что полученные результаты вполне доступны экспериментальной проверке и будут широко востребованы в контексте задач, прежде всего, физики горячей лабораторной [4] и астрофизической [5] плазмы.

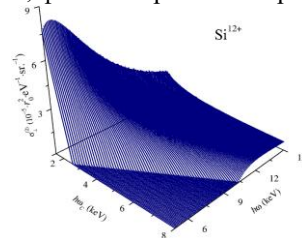


Рис. 1. Дважды дифференциальное сечение тормозного излучения при нерезонансном неупругом рассеянии рентгеновского фотона атомным ионом Si^{12+} ($d^2\sigma_{\perp} / d(\eta\omega_c)d\Omega_c \equiv \sigma_{\perp}^{(2)}$, Ω_c – пространственный угол вылета рассеянного фотона). r_0 – классический радиус электрона, $\hbar\omega$ ($\hbar\omega_c$) – падающий (рассеянный) фотон. Угол рассеяния фиксирован величиной $\theta = 90^\circ$. Спектральное разрешение предполагаемого эксперимента не учитывалось ($\Gamma_{beam} = 0$).

Список литературы

1. Hopersky A.N., et.al. // JETP. 2020. V. 131. P. 895.
2. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M. // Phys. Rev. A. 2008. V. 77. P. 022712.
3. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M.. // JETP. 2012. V. 115. P. 402.
4. Indelicato P. // J. Phys. B. 2019. V. 52. P. 232001.
4. Zhekov S., et al. // MNRAS. 2022. V. 510. P. 1278.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИПОЛЬНЫХ ЭКСИТОНОВ В БИСЛОЯХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Исследуется взаимодействие между дипольными экситонами в бислое дихалькогенидов переходных металлов с учетом изменения экранировки кулоновского потенциала, связанного с двумерностью слоев. Получены выражения для матричных элементов прямого, обменного и суммарного взаимодействий в зависимости от импульса частиц.

V.A. MASLOVA¹, N.S. VORONOVA^{1,2}¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia²Russian Quantum Center, Skolkovo Innovation Center, Moscow, Russia

DIPOLAR EXCITONS INTERACTION IN TRANSITION-METAL DICHALCOGENIDE HOMOBILAYERS

We study the interaction between indirect (dipolar) excitons in transition metal dichalcogenide bilayers accounting for the reduced screening of the Coulomb potential due to the layers dimensionality. Expressions for the matrix elements of direct, exchange, and total interactions dependent on the particles momentum are obtained.

Изучение дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) представляет особый интерес для физики экситонов, так как они обладают рядом свойств, отличающих их от других полупроводников. Благодаря отличным оптическим свойствам, определяемым экситонной структурой, ДПМ находят широкое применение в оптоэлектронике. Отличительной чертой монослоев и бислоев ДПМ является специфический характер экранировки кулоновского потенциала, который является обобщением потенциала Рытовой-Келдыша [1].

В настоящей работе исследуется кулоновское взаимодействие между непрямыми экситонами в бислое ДПМ. Для расчета матричных элементов взаимодействия вариационным методом найдена волновая функция и значения энергий связи непрямого экситона [2], которые позволяют оценить температуру, при которой возможно существование системы экситонов, для случая, когда слои находятся в вакууме и среде. Вычисляя матричные элементы двухчастичного гамильтониана с помощью волновых функций системы из двух экситонов, получены выражения для матричных элементов взаимодействия [3-5], которое складывается из прямого взаимодействия и обменного, связанного с симметрией волновой функции двух экситонов. С помощью численного интегрирования построен график зависимости суммарного взаимодействия от переданного волнового вектора (рис. 1).

Показано, что при малых значениях переданного импульса экситоны отталкиваются, также имеется область значений, в которой отталкивание сменяется притяжением. Величина взаимодействия значительно больше, чем в монослое, и сильно возрастает за счет прямого взаимодействия при уменьшении диэлектрической проницаемости среды и при увеличении расстояния между слоями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 21-52-12038 (совместного с DFG).

Список литературы

1. Л.В. Келдыш, Письма в ЖЭТФ **29** (11), 716 (1979).
2. М.А. Семина, ФТТ **61** (11), 2234 (2019).
3. V. Shahnazaryan, I. Iorsh, I. A. Shelykh, and O. Kyriienko, Phys. Rev. B **96**, 115409 (2017).
4. S. Ben-Tabou de-Leon and B. Laikhtman, Phys. Rev. B **63**, 125306 (2001).
5. T. Byrnes, P. Recher, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. B **81**, 205312 (2010).

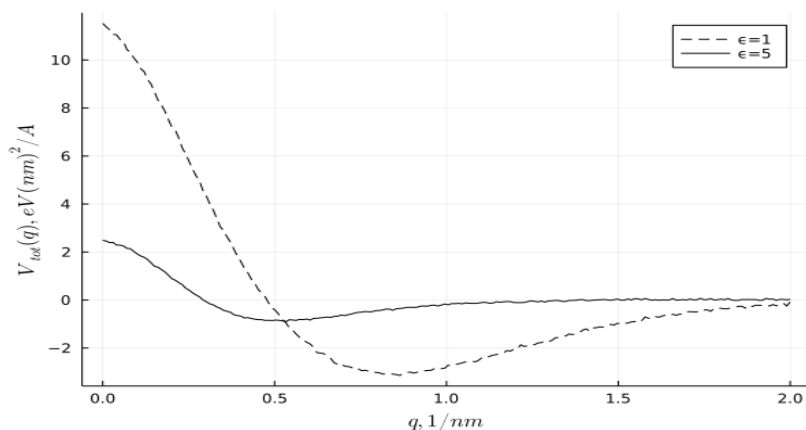


Рис. 1. Суммарное взаимодействие экситонов в бислое MoS_2 в случае, когда слои находятся в вакууме и погружены в hBN.

ТОЧНО РЕШАЕМАЯ МОДЕЛЬ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО И ЭКСИТОННОГО ТИПА ПРИ ОТЛИЧНОЙ ОТ НУЛЯ ТЕМПЕРАТУРЕ

В работе предложена решаемая модель фазовых переходов, в которой могут образовываться два конденсатных состояния - экситонного (частица-дырка) и сверхпроводящего (частица-частица) типа.

S.E.MURAVIEV, O.A.RUMYANTSEV

National Research Nuclear University "MEPhI"

A SOLVABLE MODEL OF SUPERCONDUCTING AND EXCITON-TYPE PHASE TRANSITIONS AT NON-ZERO TEMPERATURES

A solvable model of phase transitions in which two condensate states of exciton-type (particle-hole) and superconducting type (particle-particle) can be formed is proposed.

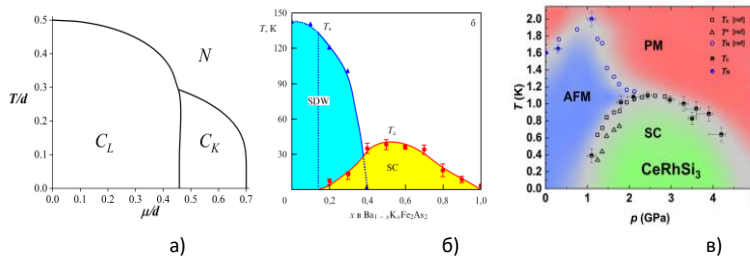
Несмотря на большое число теоретических работ, посвященных высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП, см., например, обзоры [1,2]), качественного объяснения существенного возрастания критической температуры до настоящего времени не предложено. Причина заключается в том, что не построена модель многочастичной системы с двумя конденсатными состояниями при отличных от нуля температурах.

В настоящей работе сформулирована модель ферми-системы с парным взаимодействием, разрешимая при отличных от нуля температурах, в которой существуют два конденсатных состояния указанного типа. Основой модели является двухуровневая система Липкина [3], которая в отсутствие взаимодействия квазичастиц обладает $SU_L(2) \otimes SU_K(2)$ -симметрией по отношению к рождению/уничтожению коррелированных пар частица-дырка (L -пары) и частица-частица (K -пары). Собственные состояния модели Липкина могут быть классифицированы по квантовым числам L, L_3 и K, K_3 , причем разность $L^2 - L_3^2$ определяет число коррелированных пар частица-дырка, а $K^2 - K_3^2$ - частица-частица. Введение в модель парного взаимодействия квазичастиц, сохраняющего симметрию одночастичного гамильтониана

$$\hat{F} = -\frac{d}{n}(\hat{L}^{(+)}\hat{L}^{(-)} + \hat{L}^{(-)}\hat{L}^{(+)}) - \frac{g}{n}(\hat{K}^{(+)}\hat{K}^{(-)} + \hat{K}^{(-)}\hat{K}^{(+)})$$

($\hat{L}^{(+)}$, $\hat{L}^{(-)}$ и $\hat{K}^{(+)}$, $\hat{K}^{(-)}$ – операторы рождения и уничтожения коррелированных пар частица-дырка и частица-частица, d и g - параметры взаимодействия, n - число состояний) приводит к системе со взаимодействием, для которой удается найти спектр, вычислить статистические веса всех собственных состояний и получить выражение для свободной энергии. Условие минимума свободной энергии позволяет найти квантовые числа равновесного состояния системы.

В случае взаимодействия притяжения $d, g > 0$ в системе может происходить перестройка равновесного состояния – возникают конденсаты коррелированных пар частица-дырка или частица-частица - система испытывает фазовые переходы экситонного или сверхпроводящего типа. Расчетная фазовая диаграмма (зависимость температуры перехода от химического потенциала) приведена на рисунке а), на котором символами N , C_L и C_K отмечены области существования нормального состояния (без конденсата), частично-дырочного или частично-частичного конденсатов соответственно. Расчетная фазовая диаграмма качественно воспроизводит основные черты фазовой диаграммы ВТСП-материалов, показанных на рисунках б) и в) (в том числе материалов, обнаруживающих фазовые переходы при высоких давлениях) - существование двух фазовых переходов, переходов первого и второго рода, тройных и критических точек..



Расчетная фазовая диаграмма (а) и характерные фазовые диаграммы ВТСП материалов (б) [4] и сверхпроводников при высоких давлениях [5].

Список литературы

1. Anderson P W, 2013, J. Phys.: Conf. Ser. 449 012001 (2013).
2. Belyavsky V I, and Kopaev Yu V, Usp. Fiz. Nauk 176, 457 (2006).
3. Lipkin H J, Meshkov N and Glick A J, Nucl. Phys. A62 188 (1965).
4. Sadovskii M V, Usp. Fiz. Nauk 178 1243 (2008).
5. Stasko D e.a. J. Phys.: Condens. Matter 33 035602 (2020).

Р.А. ПОТАПОВ¹, А.А. МИРОНОВ², А.М. ФЕДОТОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЮСОВ ФОТОННОГО ПРОПАГАТОРА В ПОСТОЯННОМ СКРЕЩЕННОМ ПОЛЕ В ПУЗЫРЬКОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Численно найдены полюса фотонного пропагатора в постоянном скрещенном поле в пузырьковом приближении. Исследовано влияние учета дополнительных полюсов на координатную зависимость фотонного пропагатора.

R.A. POTAPOV¹, A.A. MIRONOV², A.M. FEDOTOV¹

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

² Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

STUDY OF THE POLES OF A PHOTON PROPAGATOR IN A CONSTANT CROSSED FIELD IN THE BUBBLE APPROXIMATION

The poles of a photon propagator are found numerically in a constant crossed field in the bubble approximation. The influence of taking into account additional poles on the coordinate dependence of the photon propagator is studied.

Как известно, пропагаторы в КЭД одеваются радиационными поправками, которые во внешнем поле не задуляются на массовой поверхности. Радиационные поправки к фотонному пропагатору определяются поляризационным оператором, вычисленным в [1]. В постоянном скрещенном поле точный фотонный пропагатор с учетом однопетлевой поправки к поляризационному оператору имеет бесконечное число полюсов [2]. До сих пор ближайший к массовой поверхности полюс интерпретировался как индуцируемая полем эффективная масса фотона, а остальные полюса игнорировались [3].

Аналитическая структура фотонного пропагатора полностью определяется аналитическими свойствами поляризационного оператора. Решение уравнений $l^2 = \Pi_{1,2}(l^2, \chi_l)$ определяют положения полюсов пропагатора и учет дополнительных полюсов увеличивают точность расчета пропагатора в координатном представлении. Поскольку компоненты поляризационного оператора имеют сложное аналитическое представление, на практике нахождение полюсов возможно только численно. Результаты такого расчета представлены на Рис. 1.

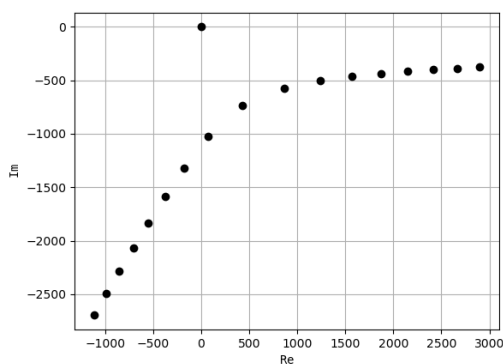


Рис. 1. Решения полюсного уравнения для Π_1 при $\chi_l=1000$ в комплексной плоскости виртуальности l^2 .

Полюсное уравнение имеет одно решение вблизи массовой поверхности и счетное число дополнительных решений, асимптотически стремящихся к действительной оси и прямой с аргументом $\pi/3$.

Список литературы

1. Narozhny N.B. // Sov. Phys. JETP 1969. V. 28, P. 371.
2. Ritus V. I. // Annals of Physics. 1972. V. 69, № 2. P. 555.
3. Mironov A.A., Meuren S., Fedotov A.M. // Phys.Rev D 2020. V. 102. P. 053005.

РАЗЛЕТ МИШЕНИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

В работе проведена серия гидродинамических расчетов разлета мишени при облучении наносекундным лазерным импульсом. Показано, какие профили плазмы можно ожидать в зависимости от плотности потока энергии излучения. Предложена аппроксимация профиля плотности разлетевшейся плазмы, а также на вычислена зависимость градиента профиля плазмы и температура плазмы от плотности потока энергии.

M.A. RAKITINA, S.I. GLAZYRIN, A.V. BRANTOV
Physical Institute. P.N. Lebedev, Moscow, Russia

TARGET EXPLOSION UNDER THE ACTION OF NANOSECOND LASER PULSE

In this work, a series of hydrodynamic calculations of the expansion of a target under irradiation with a nanosecond laser pulse is carried out. It is shown which plasma profiles can be expected depending on the radiation energy flux density. An approximation of the extended plasma density profile is proposed and the dependence of the plasma profile gradient and plasma temperature on the energy flux density is calculated.

В ходе расчетов использовались лазерные импульсы с интенсивностью от $I = 10^8$ Вт/см² до $I = 10^{14}$ Вт/см², длительность лазерного импульса варьировалась от $t = 0.5$ нс до $t = 5$ нс, в качестве мишеней рассматривались алюминий и углерод. Целью работы являлось нахождение профилей плотности разлетевшейся плазмы в зависимости от типа мишени, начального профиля, интенсивности и длительности лазерного импульса.

Профиль низкоплотной докритической плазмы можно аппроксимировать при помощи двух экспонент. Полученная функция, описывающая низкоплотную плазму, записывается в виде:

$n(x) = n_1 \theta(\Delta x - x) \text{Exp} \left\{ -\frac{x}{dx_1} \right\} + n_2 \theta(x - \Delta x) \text{Exp} \left\{ -\frac{x}{dx_2} \right\}$, где dx_1 и dx_2 – градиенты плотности плазмы.

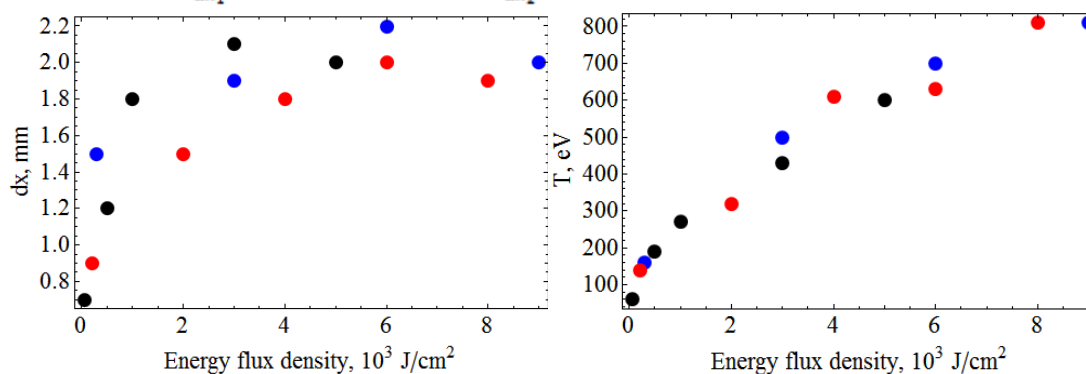


Рис. 1. Зависимости градиента плотности докритической плазмы и температуры плазмы от энергии лазерного импульса для докритической плазмы после прохождения импульса. Черными точками отмечены лазерные импульсы с длительностью $\tau = 5$ нс, синими - с длительностью $\tau = 3$ нс, красными - с длительностью $\tau = 2$ нс

В качестве мишени был взят алюминий, на Рис. 1 показаны результаты расчетов для момента времени $t=15$ нс. С ростом плотности потока энергии растет значение характерных градиентов плотности разлетевшейся плазмы. Из Рис. 1 видно, что характерная величина градиента, описывающего профиль плотности хвоста плазмы (плотность плазмы ниже 0.1-0.2 критической плотности) выходит на насыщение (~ 2 мм.) при значениях плотности потока энергии $\sim 10^3$ Дж/см². Стоит отметить, что при этих значениях плотности потока энергии рост температуры плазмы с увеличением вложенной энергии также несколько замедляется (см. Рис. 1).

Для изучения зависимости профиля разлетевшейся плазмы от материала мишени, мишени из углерода и алюминия облучались лазерным импульсом с интенсивностью от $I = 10^8$ Вт/см² до $I = 10^{13}$ Вт/см² и длительностью $t = 0.5$ нс. Вычислено, что при интенсивностях лазерного импульса выше $I = 10^{10}$ Вт/см² профиль плотности плазмы практически не зависит от материала мишени, тогда как для меньших интенсивностей мишень из углерода разлетается сильнее. При тех же интенсивностях были проведены расчеты для сравнения профиля плотности разлетевшейся плазмы в зависимости от начального профиля плотности для мишени из алюминия. Профиль плотности полученной плазмы также практически не зависит от начального профиля мишени. Было проведено исследование зависимости плотности разлетевшейся плазмы от плотности потока энергии лазерного импульса. При плотностях потока энергии, превышающих 10^3 Дж/см², профиль плазмы при одинаковых плотностях потока энергии лазера мало зависит от различий в длительности или интенсивности импульса.

Работа поддержана грантом РФФИ - Росатом № 20-21-00023.

А.П. СЕВЕРЮХИН

Лаборатория Теоретической Физики им. Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ, Дубна, Россия

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ШИРИНЫ ДВОЙНОГО ГАММА РАСПАДА КВАДРУПОЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ЯДРА

Предложена модель для описания ширины двойного γ -распада состояния 2^+_{1} четно-четного сферического ядра. Построенная на функционале плотности энергии Скимма модель позволяет выполнить расчеты с учетом большого конфигурационного пространства. Показано, что ширина $\gamma\gamma$ -распада чувствительна к величине смешивания простых и сложных конфигураций в области гигантского дипольного резонанса.

A.P. SEVERYUKHIN

Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR, Dubna, Russia

THE MODEL FOR DESCRIBING THE WIDTH OF DOUBLE GAMMA DECAY OF THE QUADRUPOLE STATE OF SPHERICAL NUCLEI

We suggest the model for describing the width of the double γ -decay of the 2^+_{1} state of an even-even spherical nucleus. Using the model based on the Skyrme energy density functional, the large configuration space is taken into account. It is shown that the $\gamma\gamma$ decay width is sensitive to the mixing of the simple and complex configurations of the giant dipole resonance.

Конкурентные $\gamma\gamma$ -распады, которые происходят во втором порядке по электромагнитному взаимодействию, открывают новые подходы к изучению коллективных мод ядерной структуры. Экспериментальное подтверждение двойного γ распада ядерного перехода в условиях конкуренции с одинарным описано в работе [1]. Измеряемая поляризуемость (α_{LL}) определяет относительную ширину двойного γ распада. Новый эксперимент, проведенный совсем недавно [2], уточнил свойства ядерного двойного γ распада, в частности, в отношении вклада различных мультипольностей. Однако ядерный $\gamma\gamma$ -распад с доминирующим вкладом $E1E1$ еще не найден.

Исследован процесс $\gamma\gamma$ -распада низкоэнергетического квадрупольного состояния четно-четного ядра [3]. В качестве примера было рассмотрено первое возбужденное состояние ^{48}Ca . Впервые рассчитано отношение ширины $\gamma\gamma/\gamma$ -распадов и получено максимальное значение 10^{-8} , которое может быть проверено экспериментально.

Ширина двойного γ -распада чувствительна к величине смешивания простых и сложных конфигураций в области гигантского дипольного резонанса (ГДР). Микроскопические расчеты с функционалом плотности энергии Скимма показали, что однофононная ГДР конфигурация и двухфононная конфигурация типа $[\text{ГДР} \times 2^+_{1}]$ играет ключевую роль в расчете ширины [3]. В рамках предложенной модели мы рассмотрели нейтронно-избыточные изотопы олова, для которых существуют оценки дипольной поляризуемости. Таким образом, можно ее сравнить с обобщенной поляризуемостью α_{E1E1} .

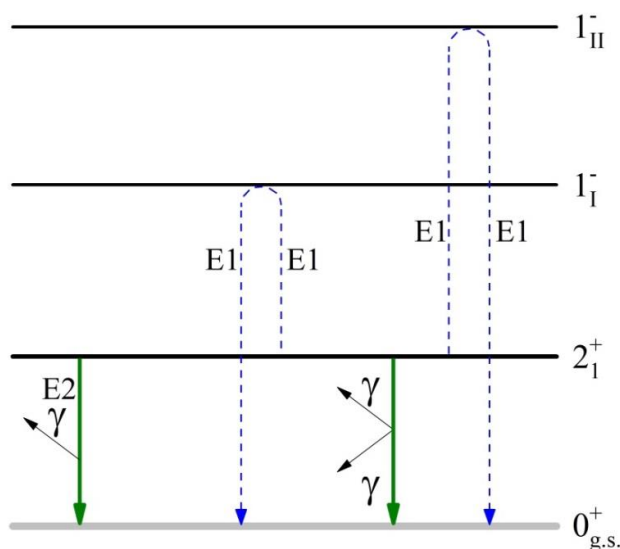


Рис. 1. Схема для оценки ширины ядерного двойного γ -распада. Виртуальные переходы отмечены штриховыми линиями

Список литературы

1. Walz C. et al. // Nature. 2015. Vol. 526, P. 406.
2. Söderström P.-A. et al. // Nature Commun. 2020. Vol. 11, P. 3242.
3. Severyukhin A.P., Arsenyev N.N., Pietralla N. // Phys. Rev. C. 2021. Vol. 104, P. 024310.

Е.С. СОЗИНОВ¹, А. А. МИРОНОВ^{2,3}, А. М. ФЕДОТОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

УРАВНЕНИЕ ДАЙСОНА-ШВИНГЕРА СКАЛЯРНОЙ КЭД В ПОСТОЯННОМ СКРЕЩЕННОМ ПОЛЕ В РАДУЖНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Выведено уравнение Дайсона-Швингера скалярной КЭД в постоянном скрещенном поле в радужно-пузырьковом приближении, в котором учитываются радужные поправки всех порядков с фотонными пропагаторами в пузырьковом приближении. Предполагается, что такие диаграммы доминируют в непертурбативном режиме сверхсильного поля, предсказываемом гипотезой Ритуса-Нарожного.

E.S. SOZINOV¹, A. A. MIRONOV², A. M. FEDOTOV¹

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

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DYSON-SCHWINGER EQUATION FOR A SCALAR ELECTRON SELF-ENERGY IN A CONSTANT CROSSED-FIELD IN A RAINBOW APPROXIMATION

The Dyson-Schwinger equation for scalar QED in a constant crossed field in the rainbow-bubble approximation is derived, which considers all-order rainbow corrections with photon propagators in the bubble approximation. It is assumed that such diagrams should dominate in a nonperturbative superstrong field regime predicted by the Ritus-Narozhny conjecture.

В последнее время большой интерес вызывает гипотеза Ритуса-Нарожного, согласно которой параметр петлевого разложения некоторых радиационных КЭД поправок в сильном постоянном скрещенном поле перестает быть малым, в связи с чем они начинают требовать непертурбативного учета. В настоящее время точный набор подлежащих в этом режиме суммированию во всех порядках диаграмм еще окончательно не определен, пока удалось только просуммировать вклад пузырьковых поправок и для них подтвердить гипотезу [1]. Однако, из того, что основной вклад в них вносят мягкие виртуальные фотоны, следует, что суммарный вклад радужно-пузырьковых поправок может оказаться сравнимым со вкладом пузырьковых поправок.

Для окончательного выяснения этого вопроса нужно явно просуммировать радужно-пузырьковые диаграммы в пределе сильного поля. Поскольку общая тензорная структура поляризационного оператора и фотонного пропагатора, а также общая матричная структура массового оператора и электронного оператора известны [2,3], можно, исходя из уравнений Дайсона-Швингера, составить скелетные уравнения для вклада радужных диаграмм и, приравнивая коэффициенты при соответствующих структурах, получить систему уравнений на коэффициенты при них. В этом смысле скалярная КЭД является более простой, поскольку в ней вершины не имеют матричной структуры. Кроме того, есть основания полагать, что в очень сильных полях спиновые эффекты не являются определяющими. Вообще говоря, калибровочная инвариантность требует учета в скалярной КЭД как однофотонных, так и двухфотонных вершин взаимодействия, что приводит к сложной комбинаторике [4]. Тем не менее, с учетом того, что радужные поправки все равно не являются калибровочно-инвариантными, представляет интерес сперва просуммировать радужно-пузырьковые диаграммы в рамках скалярной КЭД с учетом только однофотонных вершин, что и обсуждается в предлагаемом докладе.

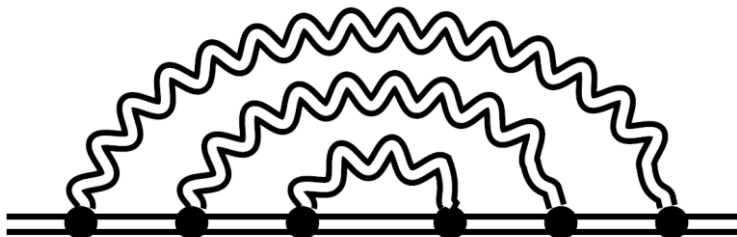


Рис. 1. Трехпетлевая радужная диаграмма, прямой линией обозначен пропагатор электрона, волнистой – пропагатор фотона в пузырьковом приближении.

Список литературы

1. Mironov, A. A., Meuren, S., Fedotov, A. M. // Physical Review D. 2020. V. 102, №5. P. 053005.
2. Ritus, V. I. // Annals of Physics. 1972. V. 69, № 2. P. 555.
3. Mironov, A. A., Fedotov, A. M. // Physical Review D. 2022. V. 105, №3. P. 033005.
4. Berezin, A.V., Mironov, A.A., Sozinov, E.S. and Fedotov, A.M. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2036, №1. P. 012008.

Е.С. СОЗИНОВ¹, Л.В. БОРК², Н.Б. МУЖИЧКОВ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²НИИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, Россия

³Институт теоретической и математической физики, МГУ, Москва, Россия

ИНФРАКРАСНЫЕ СВОЙСТВА АМПЛИТУД РАССЕЙНИЯ МАССИВНЫХ ЧАСТИЦ В N=4 SYM

Рассмотрено поведение 5-точечной амплитуды рассеяния W-бозонов в N=4 SYM в пределе малой массы. Показано, что в двухпетлевом приближении инфракрасные расходимости экспоненцируются и контролируются аномальной размерностью Γ_{oct} , что согласуется с недавними результатами для случая 4-точечной амплитуды. Также нами предложена гипотеза о точной структуре 5-точечной амплитуды рассеяния.

E.S. SOZINOV¹, L.V. BORK², N.B. MUZHICKOV³

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

²Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

³Institute for Theoretical and Mathematical Physics, MSU, Moscow, Russia

INFRARED PROPERTIES OF MASSIVE SCATTERING AMPLITUDES IN N=4 SYM

The behavior of the 5-point scattering amplitude of W-bosons in N=4 SYM in the small-mass limit is considered. It is shown that, in the two-loop approximation, infrared divergences exponentiate and are controlled by the anomalous dimension Γ_{oct} , which is consistent with recent results for the case of a 4-point amplitude. We also proposed a hypothesis regarding the exact structure of the 5-point scattering amplitude in this case.

В последнее время был достигнут большой прогресс в понимании структуры амплитуд в суперсимметричных калибровочных теориях [1]. Наиболее известным примером N=4 Максимально Суперсимметричная теория Янга-Миллса (N=4 SYM).

Большинство результатов, которые были получены, относятся к случаю ненарушенной калибровочной симметрии, когда частицы из супермультиплета N=4 SYM являются безмассовыми. Однако можно воспользоваться свободой выбора вакуумных средних скалярных полей из лагранжиана N=4 SYM и рассмотреть N=4 SYM со спонтанно нарушенной калибровочной симметрией, когда некоторые частицы становятся массивными. Такой подход является одним из способов регуляризации инфракрасных расходимостей в амплитудах рассеяния.

Недавние результаты [2] предполагают, что, вероятно, существует новая дуальность между амплитудами с массивными внешними частицами и корреляционными функциями операторов 1/2-BPS с большим R-зарядом. Методы, основанные на интегрируемости [3,4,5], позволили авторам [2,6] получить точный результат для четырехточечной корреляционной функции, которая, как предполагалось, двойственна четырехточечной массивной амплитуде. Но что было, пожалуй, важнее, результаты [2] показали, что ИК-расходимости в этом массивном случае не контролируются аномальной размерностью Γ_{cusp} в противоречии с тем, что ожидалось ранее [7]. Оказалось, что ИК-расходимости в этом случае контролируются другой известной функцией Γ_{oct} , возникшей при вычислении четырехточечного коррелятора операторов с большим R-зарядом.

В работе рассматривается случай пятиточечной амплитуды рассеяния W-бозонов в N=4 SYM в пределе малой массы, обсуждается структура мастер-интегралов, которые входят в разложение этой амплитуды [8]. Затем соответствующие интегралы вычисляются в специальном кинематическом пределе, что позволяет показать, что инфракрасные расходимости экспоненцируются и контролируются Γ_{oct} .

Одним из наиболее важных результатов является возможность зафиксировать конечную часть амплитуды благодаря полученным результатам с точностью до функции, не зависящей от кинематики [8].

Список литературы

1. Elvang H, Huang YT. Scattering amplitudes in gauge theory and gravity: Cambridge University Press, 2015.
2. Caron-Huot, S., & Coronado, F.// arXiv preprint arXiv:2106.03892 (2021).
3. Fleury, T., & Komatsu, S.// Journal of High Energy Physics, 2017(1), 1-45 (2017)
4. Fleury, T., & Komatsu, S.// Journal of High Energy Physics, 2018(2), 1-35 (2018)
5. Basso, B., Coronado, F., Komatsu, S., Lam, H. T., Vieira, P., & Zhong, D. L.// Journal of High Energy Physics, 2019(7), 1-59 (2019)
6. Coronado, F.// Physical Review Letters, 124(17), p.171601 (2020)
7. Drummond, J. M., Korchemsky, G. P., & Sokatchev, E.// Nuclear Physics B, 795(1-2), 385-408 (2008)
8. Bork, L. V., Muzhichkov, N. B., & Sozinov, E. S. // arXiv preprint arXiv:2201.08762 (2022)

Н.Е. СОЛОНОВИЧ^{1,2}, Н.Н. АРСЕНЬЕВ¹, А.П. СЕВЕРЮХИН^{1,2}
¹Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, Дубна, Россия;

²Государственный университет Дубна, Дубна, Россия

ДИПОЛЬНАЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ И НЕЙТРОННАЯ ШУБА ДВАЖДЫ МАГИЧЕСКИХ ЯДЕР

Новые спектроскопические исследования изовекторного гигантского дипольного резонанса (ГДР) в нейтронно-избыточных ядрах стимулируют развитие ядерных моделей. Одним из успешных инструментов для описания ГДР является приближение случайных фаз (ПСФ) с самосогласованным средним полем, полученным с использованием эффективного нуклон-нуклонного взаимодействия Скирма. В данной работе рассмотрены распределения силы $E1$ -переходов в ядрах ^{48}Ca , ^{68}Ni и ^{208}Pb , а также ядерная электрическая дипольная поляризуемость. Проанализированы корреляции между электрической дипольной поляризуемостью и толщиной нейтронной «шубы». На основании полученных корреляций и имеющихся экспериментальных данных удастся уточнить значение энергии симметрии.

N.Y. SOLONOVICH^{1,2}, N.N. ARSENYEV¹, A.P. SEVERYUKHIN^{1,2}

¹Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics JINR, Dubna, Russia

²Dubna State University, Dubna, Russia

THE DIPOLE POLARIZABILITY AND NEUTRON SKIN OF DOUBLY-MAGIC NUCLEI

New spectroscopic studies of the isovector giant dipole resonance (GDR) in neutron-rich nuclei stimulate the development of nuclear models. One of the successful tools for describing the GDR is the random phase approximation (RPA) with the self-consistent mean-field derived from a Skyrme-type effective nucleon-nucleon interaction. We consider the $E1$ strength distributions of ^{48}Ca , ^{68}Ni , and ^{208}Pb and the electric dipole polarizability. The correlations between the electric dipole polarizability and the neutron skin thickness are analyzed. As result we predict the value of the symmetry energy.

Мультипольные гигантские резонансы являются универсальной особенностью отклика атомных ядер на внешнее возмущение. Они могут возбуждаться в самых различных реакциях независимо от типа налетающих частиц и природы их взаимодействия с нуклонами ядра [1]. Изучение коллективных степеней свободы, связанных с мультипольными резонансами, дает универсальные возможности определение фундаментальных ядерных характеристик и получения сведений о структуре ядра, о компонентах эффективных взаимодействий нуклонов в ядрах. В последние годы заметно вырос интерес к экспериментальным и теоретическим исследованиям изовекторного гигантского дипольного резонанса (ГДР) в ядрах, удаленных от границ ядерной стабильности. Интерес объясняется возможностью получить ядерные системы, обладающие экзотическими свойствами, которых нет у стабильных ядер, такие как нейтронное и протонное гало, пигми-резонанс [2,3,4]. Эти исследования существенно уточняют наши знания об изовекторных свойствах атомных ядер. В частности, электрическая дипольная поляризуемость одна из наблюдаемых величин, которая измеряется экспериментально и является индикатором чувствительности к изовекторной части эффективного ядерного взаимодействия. Одним из основных подходов описания ядерных возбуждений является приближение случайных фаз (ПСФ) с эффективными силами Скирма [5]. Такие расчеты не требуют введения новых параметров, так как остаточное взаимодействие получено самосогласованным образом с тем же самым функционалом плотности энергии, как и среднее поле.

В данном докладе мы применяем этот подход для изучения чувствительности электрической дипольной поляризуемости к толщине нейтронной «шубы» на примере дважды магических ядер ^{48}Ca , ^{68}Ni и ^{208}Pb . К этим ядрам имеется особый интерес из-за наличия экспериментальных данных, что позволяет с той или иной точностью говорить о достоверности теоретических оценок. Получено хорошее согласие рассчитанных характеристик указанных ядер с экспериментальными данными. Применение корреляционного анализа показало, что между электрической дипольной поляризуемостью и толщиной нейтронной «шубы» наблюдается устойчивая корреляция. Сравнение полученных значений с экспериментальными данными позволило оценить интервал значений для величины энергии симметрии [6].

Список литературы

1. Harakeh M.N., van der Woude A. Giant resonances: Fundamental high-frequency modes of nuclear excitation. 2001. Oxford.
2. Savran D., Aumann T., Zilges A. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2013. Vol. 70. P. 210–245.
3. Bracco A., Lanza E., Tamii A. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2019. Vol. 106. P. 360–433.
4. Zilges A., Balabanski D.L., Isaak J., Pietralla N. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2022. Vol. 122. P. 103903
5. Paar N., Vretenar D., Khan E., Colò G. // Rep. Prog. Phys. 2007. Vol. 70. P. 691–793.
6. Solonovich N.E., Arsenyev N.N., Severyukhin A.P. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. Vol. 19. in press.

Р.И. ХУСНУТДИНОВ^{1,2}, А.Б. КУКУШКИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

ОБОБЩЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА SXB ДЛЯ ВОДОРОДА НА СЛУЧАЙ СМЕСИ ЕГО ИЗОТОПОВ

Модифицированный метод SXB для водорода, использующий асимметрию спектрального контура линии вместо учета молекулярного спектра, был обобщен на случай смеси изотопов дейтерия и трития. Метод позволяет рассчитывать потоки изотопов атомов и молекул с первой стенки в плазму в режиме реального времени.

R.I. KHUSNUTDINOV^{1,2}, A.B. KUKUSHKIN^{1,2}

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

² National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

GENERALIZATION OF MODIFIED SXB METHOD FOR HYDROGEN ON ITS ISOTOPES MIX CASE

The modified SXB method for hydrogen, which uses the asymmetry of the spectral line shape instead of taking into account the molecular spectra, has been generalized on the case of deuterium and tritium isotopes mixture. The method allows us to calculate in real time the atomic and molecular isotopes fluxes from the first wall.

Известный метод SXB [1], используемый для оценки плотности потока примесных атомов/ионов с первой стенки токамака в плазму по измеренной интенсивности излучения в спектральной линии, интегральной по длине волны в пределах ширины этой спектральной линии, был модифицирован на случай водорода в [2]. Необходимость модификации обусловлена более сложной, чем у примесей, кинетикой проникновения водорода в плазму: в методе SXB отсутствует учет перезарядки атомов на ионах. В методе [2] уравнение, соответствующее методу DXB (аналог метода SXB для молекулярного потока со стенки), заменено на уравнение, использующее асимметрию спектрального контура бальмеровской линии водорода $H\alpha$, измеренного с помощью спектроскопии высокого разрешения. Актуальность предложенной модификации обусловлена тем, что молекулярные спектры водорода не будут использоваться для диагностики работы ИТЭР из-за трудностей их интерпретации. Для расчета атомных и молекулярных потоков со стенки в методе [2] использованы пространственные профили парциальных вкладов в плотности этих потоков, смоделированных с помощью баллистической модели [3]. Метод [2] позволяет оценивать – в режиме реального времени – потоки атомарного и молекулярного водорода в плазму с первой стенки в основной камере токамака (не в диверторе). Этот метод был верифицирован сравнением с результатами кода EIRENE, детально моделирующего кинетику рециклинга дейтерия для шести типов профилей параметров плазмы в пристеночной плазме ИТЭР, рассчитанных кодом SOLPS4.3 и доведенных до первой стенки кодом OEDGE. Метод [2] позволяет оценить потоки атомов и молекул одного сорта изотопов водорода вблизи стенки по порядку величины в некотором диапазоне режимов работы ИТЭР (когда отфильтрован фон от рассеянного диверторного света и преобладает вклад одного участка СОЛ на хорде наблюдения в основной камере).

В настоящей работе метод [2] обобщен на случай смеси изотопов водорода. В результате удалось получить систему уравнений, которая учитывает интенсивность излучения, интегральную по длине волны, первый и второй моменты спектрального контура линии с учетом асимметрии для каждого изотопа и имеет такие неизвестные: плотности т.н. конверсионного потока атомов каждого сорта (т.е. атомов, образованных путем рекомбинации уходящих из плазмы ионов без превращения образованных атомов в молекулы на стенке с температурой стенки) и плотности потока разных сортов молекул со стенки (напр., молекул DT). Полученная система из пяти уравнений с пятью неизвестными является плохо обусловленной, что требует регуляризации по Тихонову с условием равенства атомарных и молекулярных потоков по порядку величины.

Связь асимметрии спектральных линий с плотностью потока атомов может быть добавлена в набор уравнений, решаемых в многопараметрических обратных задачах [4-6] для спектроскопической диагностики водорода в пристеночной плазме в токамаках ИТЭР и ДЖЕТ, которые в режиме реального времени пока не решаются.

Авторы благодарны В.С. Неверову за расчеты по модифицированной баллистической модели [7].

Список литературы

1. Behringer K.H. // J. Nucl. Mater. 1987. 145–147. 145.
2. Khusnutdinov R.I., Kukushkin A.B. // Physics of Atomic Nuclei. 2019. 82 (10) 1392.
3. Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S., Shurygin V.A. // Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2–6 July 2012), P4.093.
4. Kukushkin A.B., Neverov V.S., Alekseev A.G., Liso S.W., Kukushkin A.S. // Fusion Sci. Tech. 2016. 69 628.
5. Neverov V.S., Kukushkin A.B., et al. // Nucl. Fusion. 2017. 57 016031.
6. Neverov V.S., Kukushkin A.B., et al. // Nucl. Fusion. 2019. 59 046011.
7. Kukushkin A.B., et al. // Plasma Phys. Contr. Fusion. 2021. 63 (3) 035025.

К.Е. ГОРОДНИЧЕВ, С.И. ГЛАЗЫРИН, С.Е. КУРАТОВ

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ УСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛАХ АТВУДА

В работе представлено исследование влияния объемных неоднородностей плотности на устойчивость контактной границы при её ускоренном движении. Получено, что в отличие от случая неустойчивости Рэля-Тейлора рост искривления границы происходит как на стадии ускорения, так и при торможении.

K.E. GORODNICHEV, S.I. GLAZYRIN, S.E. KURATOV

Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, Russia

STABILITY OF THE ACCELERATED CONTACT BOUNDARY IN THE PRESENCE OF DENSITY PERTURBATIONS AT DIFFERENT ATWOOD NUMBERS

The influence of volume density perturbations on the stability of the contact boundary during its acceleration is considered. In contrast to the case of Rayleigh-Taylor instability, the contact discontinuity perturbation growth occurs both at the acceleration and deceleration stages.

Получение источника энергии, в основе которого лежит процесс энерговыделения при протекании термоядерных реакций, до сих пор остаётся одной из наиболее актуальных мировых задач. В схемах инерциального удержания наибольший успех достигнут на установке лазерного термоядерного синтеза NIF [1], где эксперименты вплотную подошли к порогу зажигания. Зажигание должно происходить за счёт сферического сжатия газовой смеси (DT), окружённой DT льдом.

На текущий момент достичь требуемого энергетического выхода не удаётся. Считается, что это связано с неконтролируемым ростом гидродинамических неустойчивостей [2]. На данный момент в литературе практически не представлен анализ влияния шероховатости границы аблятор-лёд на искривление внутренней поверхности слоя льда при сжатии.

Из литературы и проведённого нами анализа следует, что наличие шероховатости приводит к появлению поля возмущений плотности в слое льда после прохождения по нему ударной волны. В данной работе представлены результаты теоретического и численного анализа влияния поля возмущений плотности на устойчивость контактной границы двух сред при наличии ускорения в двухмерной постановке. С использованием преобразований Лапласа в рамках линейного приближения найдены временные зависимости роста возмущения контактной границы от времени. Проведено сравнение с результатами численных расчётов.

Список литературы

1. Kline J et al// Nucl. Fusion. 2019. Vol. 59, P. 112018
2. Meezan N B et al// Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. №59, P. 014021

С.Е. КУРАТОВ, И.С.МЕНЬШОВ, С.Ю.ИГАШОВ, Д.ШИДЛОВСКИЙ
ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КУМУЛЯЦИИ, ИНИЦИИРОВАННЫЙ КВАНТОВЫМИ ОБОЛОЧЕЧНЫМИ ЭФФЕКТАМИ

Представлены результаты теоретического и численного исследования гидродинамической кумуляции, вызванной квантовыми оболочечными эффектами.

S.E. KURATOV, I. S. MENSHOV, S. Y. IGASHOV, D. S. SHIDLOVSKI
FSUE Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, Russia

NEW MECHANISM OF HYDRODYNAMIC CUMULATION CAUSED BY QUANTUM SHELL EFFECTS

Presents the results of a theoretical and numerical study of hydrodynamic cumulation caused by quantum shell effects

Проведенный расчетно-теоретический анализ демонстрирует существование нетривиального механизма сжатия газового пузыря субмикронного размера, образованного неидеальным газом классических ионов и газом вырожденных электронов. Из-за существования крупномасштабного электрического поля, вызванного квантовыми оболочечными эффектами, процесс сжатия характеризуется образованием большого количества ударных волн. Такой механизм принципиально отличается от обычного механизма адиабатического сжатия. Показано, что учет квантового эффекта крупного масштаба качественно меняет характер кумулятивных процессов. Значения температуры и давления газа увеличиваются на два порядка по сравнению с режимом адиабатического сжатия.

Анализ проводился в модельной постановке, в которой эффект крупного масштаба учитывался наличием внешнего электрического поля. Аналитический анализ проясняет природу кумулятивных процессов, а численный анализ позволяет оценить количественные характеристики нового механизма гидродинамической кумуляции.

Анализируется возможность экспериментального наблюдения данного механизма гидродинамической кумуляции.

СЛАБАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВОЛН В АНСАМБЛЕ РЕЗОНАНСНЫХ МИ-ЧАСТИЦ ВБЛИЗИ ТОЧКИ КЕРКЕРА

В работе вычислена интерференционная поправка к оптическому кондактансу ансамбля Ми-частиц. Показано, что в узкой спектральной области вблизи первого условия Керкера интерференционный вклад удваивается.

E.E.GORODNICHEV, D.B.ROGOZKIN

National Research Nuclear University "MEPhI"

WEAK LOCALIZATION OF WAVES IN AN ENSEMBLE OF RESONANT MIE-PARTICLES NEAR THE KERKER POINT

We present the results of calculations of the interference correction to the optical conductance of an ensemble of Mie particles. It is shown that the interference contribution doubles in a narrow spectral region near the first Kerker condition.

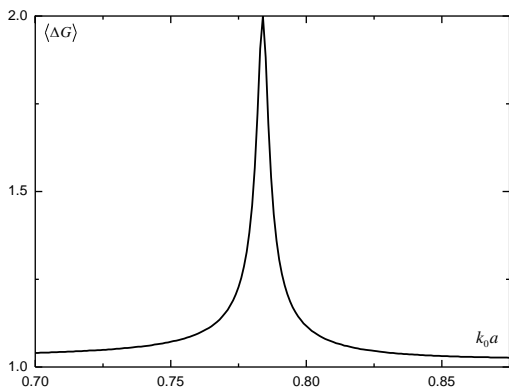
Эффект слабой локализации электронов в металлах с примесями приводит к уменьшению кондактанса проводящего образца [1]. Ввиду эквивалентности волнового уравнения для классических полей и уравнения Шредингера для электронов, слабая локализация электромагнитных волн в рассеивающей среде также приводит к уменьшению оптического кондактанса. В этом случае могут дополнительно проявляться особенности, связанные с векторной природой волн.

Усреднённый по расположению рассеивателей интерференционный вклад в кондактанс определяется диаграммой, изображённой на рис.1 (см., например, [1]). Вычисление этой диаграммы можно выполнить, «перезамыкая» входящие пропагаторы в результате, полученном в [2] для корреляционной функции флуктуаций интенсивности. В диффузионном приближении (см. [2]) это приводит к следующему выражению:

$$\text{Рис.1 } \langle \Delta G \rangle = 2\pi \cdot \left(\frac{l_{tr}}{L} \right)^2 \cdot \int_0^L \frac{dz}{l_{tr}} \int \frac{Adq}{(2\pi)^2} [I(z, z' | \vec{q}) + V(z, z' | \vec{q})] \quad (1)$$

где A и L - площадь поверхности и толщина образца, l_{tr} - транспортная длина. Входящие в (1) Фурье-образы по параллельным поверхности координатам интенсивности $I(z, z' | \vec{q})$ и основной моды циркулярной поляризации $V(z, z' | \vec{q})$ (четвёртого параметра Стокса) подчиняются диффузионным уравнениям. В отсутствие поглощения в среде пропагатор интенсивности $I(z, z' | \vec{q})$ меняется на масштабах порядка толщины образца. Пропагатор $V(z, z' | \vec{q})$ затухает на масштабах порядка $l_{circ} = \sqrt{l_{tr} l_{dep}} / 3$, где l_{dep} - длина деполаризации циркулярно поляризованной волны (длина свободного пробега относительно рассеяния с переворотом спиральности) [2].

Согласно (1), поправка к кондактансу определяется интерференцией волн в двух долгоживущих модах, скалярной I и псевдоскалярной V . В условиях медленного затухания циркулярной поляризации вклад V в (1) оказывается сопоставим с вкладом I . В наибольшей степени этот эффект проявляется в окрестности первой точки Керкера ($(2\pi a / \lambda) \cdot n = 2.7$, где λ - длина волны света, a - радиус Ми-частиц, n их показатель преломления). Для Ми-частиц с большим показателем преломления отношение l_{dep} / l_{tr} имеет резкий максимум в узкой спектральной области и в самой точке Керкера может достигать значений порядка 10^3 [3]. Резонансное поведение длины деполаризации напрямую отражается на величине интерференционной поправки (1) и приводит практически к её удвоению в точке Керкера. Относительное изменение $\langle \Delta G \rangle$ вблизи условия Керкера проиллюстрировано на рис.2.



деполаризации напрямую отражается на величине интерференционной поправки (1) и приводит практически к её удвоению в точке Керкера. Относительное изменение $\langle \Delta G \rangle$ вблизи условия Керкера проиллюстрировано на рис.2.

Рис.2. Спектральная зависимость интерференционной поправки к кондактансу. Расчёты проведены для частиц Si (показатель преломления $n = 3.5$).

Список литературы

- [1]. Л.П. Горьков, А.И. Ларкин, Д.Е. Хмельницкий, Письма в ЖЭТФ, **30**, 248 (1979).
- [2]. Е.Е. Городничев, А.И. Кузовлев, Д.Б. Рогозкин, Письма в ЖЭТФ, **89**, 649 (2009).
- [3]. Е.Е. Городничев, А.И. Кузовлев, Д.Б. Рогозкин, Письма в ЖЭТФ, **104**, 155 (2016).

Секция
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., член-корр. РАН Колачевский
Николай Николаевич

Секретари секции

– к.ф.-м.н., доцент каф. №78
Борисюк Петр Викторович,
– к.ф.-м.н., ассистент каф. №78
Курельчук Ульяна Николаевна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9914

E-mail: UNKurelchuk@mephi.ru

Г.А. АГЕЕВ, П.В. БОРИСЮК

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ГРАНИЦЕ Si/SiO₂ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ

Рассмотрено влияние обогащенных и обедненных слоев, создаваемых поверхностными состояниями на границе Si/SiO₂, на оптические свойства фазовращателей двух различных типов: гибридного кремниво-органического и обратносмещенного pn перехода. Данные фазовращатели находят широкое применение в оптических модуляторах и иных активных элементах интегральной фотоники. Результаты получены путем численного моделирования и могут быть полезны и для легированных кремниевых элементов фотоники иной конфигурации.

G.A. AGEEV, P.V. BORISYUK

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

INFLUENCE OF THE Si/SiO₂ INTERFACE SURFACE STATES ON THE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTONICS ACTIVE DEVICES

In this paper we investigate the effect of accumulation and depletion layers created by surface states at the Si/SiO₂ interface on the optical properties of phase shifters of two different types: a silicon-organic hybrid and a reverse-shifted pn junction. These phase shifters are widely used in optical modulators and other active elements of integrated photonics. The results were obtained by numerical simulation and can also be useful for doped silicon photonic elements of a different configuration.

Структура разрешенных энергетических уровней кристалла вблизи поверхности отличается от структуры в его глубине – появляются новые локализованные у поверхности электронные состояния, которые играют роль центров захвата свободных носителей и рекомбинации. В настоящее время природа поверхностных состояний объясняется геометрической и структурной неоднородностью кристалла у его поверхности, ненасыщенными ковалентными связями приповерхностных атомов, а также присутствием примесей на поверхности [1]. В данной работе рассматриваются создаваемые поверхностными состояниями обогащенные и обедненные слои на границе Si/SiO₂, которые были хорошо изучены еще в прошлом веке в рамках исследований полупроводниковой электроники и в особенности МОП-транзисторов [2]. Однако, их влияние на активные элементы фотоники, содержащие малоразмерные легированные кремниевые структуры пока детально не изучено и является объектом исследования данной работы.

В настоящей работе исследуется вклад обедненных и обогащенных слоев, сформированных поверхностными состояниями, в пространственное распределение свободных носителей заряда, вносимые оптические потери, изменение эффективного показателя преломления моды, вызываемое управляющим напряжением, а также на омическое сопротивление, ограничивающее полосу пропускания управляющего сигнала. В рассмотрении участвуют гибридный кремниво-органический фазовращатель на основе щелевого волновода, заполненный электрооптическим полимером [3] и фазовращатель на основе обратносмещенного горизонтального pn перехода [4]. Оба устройства предназначены для изготовления на КНИ пластине с приборным слоем толщиной 220 нм и представляют собой волноводы с полосовой нагрузкой (англ. strip load) для подачи управляющего сигнала.

Основные результаты работы были получены численными методами. Пространственные распределения напряженности электрического поля, создаваемого управляющим напряжением и концентрации носителей заряда найдены для кремния с учетом поверхностных состояний путем численного решения уравнений дрейфа и диффузии совместно с уравнением Пуассона методом конечных разностей. Оптические характеристики волновода были получены путем решения уравнений Максвелла методом конечных разностей в двумерной прямоугольной сетке поперечного сечения волновода.

Результаты моделирования показали, что для щелевого волновода, лежащего в основе гибридного кремниво-органического фазовращателя, предпочтительным является легирование n-типа, поскольку оно обеспечивает меньшие вносимые потери при меньшем омическом сопротивлении для управляющего напряжения, что дает большую полосу пропускания и частоту модуляции. Для фазовращателя на основе обратносмещенного pn перехода получены пространственные распределения носителей свободных зарядов при различных смещениях и показаны отличия, вносимые поверхностными состояниями в зависимость эффективного показателя преломления моды от приложенного напряжения. Данные результаты могут быть полезны при проектировании модуляторов Маха-Цендера на основе фазовращателей рассмотренных типов [4,5].

Список литературы

1. Киселев В. Ф., Козлов С. Н., Зотеев А. В. Основы физики поверхности твёрдого тела. — М.: Изд-во Московского университета. Физический факультет МГУ, 1999.
2. Н. Lüth, "Space-Charge Layers at Semiconductor Interfaces," in *Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films*, 5th ed. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2010, ch. 7, sec. 7.7, pp. 343–353.3.
3. S. Koeber et al., "Femtojoule electro-optic modulation using a silicon-organic hybrid device," *Light Sci. Appl.*, vol. 4, no. 2, pp. e255–e255, Feb. 2015.
4. Reed, G., Mashanovich, G., Gardes, F. et al. Silicon optical modulators. *Nature Photon* 4, 518–526 (2010).
5. P. Steglich et al., "Silicon-organic hybrid photonics: Overview of recent advances, electro-optical effects and CMOS-integration concepts," *J. Phys. Photonics*, Jan. 2021.

К.М. БАЛАХНЁВ, О.С. ВАСИЛЬЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПУЧКА НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДОВ, ЗАДАЮЩИХ ОТКЛОНЯЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Реализованы метод моделирования осаждения потока кластеров разного размера в электрическом потенциале, а также метод расчёта электрического потенциала в виде ортогональной сетки в пространстве вокруг электродов. На основе смоделированных таким образом данных о траекториях частиц произведена оценка пространственного упорядочения по размеру наночастиц в плёнках, получаемых путём горизонтальной технологии осаждения. Предложена оптимальная геометрия электродов для получения градиентного распределения частиц по размерам.

K.M. BALAKHNYOV, O.S. VASILYEV

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

SIMULATION OF THE FORMATION OF A NANOPARTICLE BEAM FOR DEVELOPING A SYSTEM OF ELECTRODES SETTING DIFFERENT ELECTRIC FIELDS

A method for modeling the deposition of a flow of clusters of different sizes in an electric potential, as well as a method for calculating the electric potential in the form of an orthogonal grid in the space around the electrodes, are implemented. Based on the data on particle trajectories modeled in this way, the spatial ordering by the size of nanoparticles in films obtained by the horizontal deposition technology was estimated. An optimal geometry of electrodes is proposed for obtaining a gradient size distribution of particles.

Исследование материалов для высокоэффективного термофотовольтаического преобразования является актуальной задачей, так как такие материалы позволят увеличить эффективность большого числа источников электроэнергии и могут применяться в солнечных батареях, радиоизотопных источниках питания, двигателях внутреннего сгорания, и прочих энергоустановках, имеющих значительные тепловые потери.

В качестве одного из таких материалов, в рамках текущего исследования, рассматриваются тонкие наноструктурированные пленки, состоящие из наноразмерных металлических кластеров [1] (диаметром 2-8 нм) с пространственным упорядочением нанокластеров по размерам. Данная система является относительно простой с точки зрения экспериментальной реализации и представляет собой ансамбль плотноупакованных металлических нанокластеров с градиентным распределением наночастиц по размеру, осажденных с использованием горизонтальной технологии осаждения [2] на поверхности широкополосного диэлектрика — оксида кремния.

В целях улучшения характеристик разделения наночастиц по размерам реализованы методы моделирования процесса осаждения потока кластеров широкого диапазона размеров с использованием различной геометрии электродов.

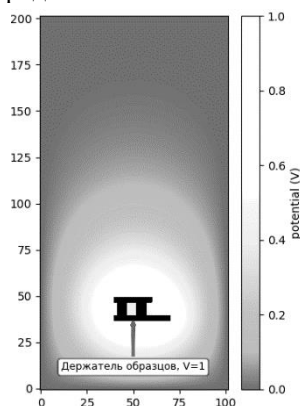


Рис. 1. Пример визуализации массива потенциалов, полученного путём моделирования разностным методом

При построении модели использовался разностный метод расчёта потенциала в поле электрода на расчётной сетке, который, в случае потенциала электрического поля, описываемого уравнением Пуассона, реализуется при помощи итеративного усреднения потенциала по ближайшим соседям и последовательной проверкой удовлетворения заданной точности [3]. На полученном потенциальном массиве интерполяцией и методом Рунге-Кутты производится расчёт траектории частиц.

Список литературы

1. Y. Maeda, et al., Appl. Surf. Sci. 222 (2004) 409
2. P. V. Borisyuk, et al. // Appl. Phys. Lett. 112, 143105 (2018)
3. Christopher E. Brennen // An Internet Book on Fluid Dynamics (2006) // URL: <http://brennen.caltech.edu/fluidbook/> (24.02.2022)

Д.В. БОРТКО, О.С. ВАСИЛЬЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЗАРЯДА В СИСТЕМЕ КЛАСТЕРОВ С ГРАДИЕНТОМ РАЗМЕРОВ

В данной работе предложена упрощенная модель энергетической структуры металлических нанокластерных частиц, а также в рамках такой модели определена зависимость уровня энергии Ферми от размера металлической частицы и количества атомов, составляющих её. На основе полученных результатов произведена оценка разности потенциалов, возникающей из-за перераспределения заряда на границе двух контактирующих кластеров.

D.V. BORTKO, O.S. VASILIEV

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

PROCESSES OF CHARGE REDISTRIBUTION INSIDE A SYSTEM OF GRADIENTLY SIZED NANOCCLUSERS

A simplified model of energy structure of metal nanoclusters is developed and in terms of this model it is found the Fermi energy's dependence on the size and the number of atoms in the cluster. It is also given here quantitative and qualitative assessments of expected voltage at the interface of two metal particles of different sizes.

На данный момент существует потребность в повышении эффективности преобразования тепловой и солнечной энергии в электрическую, в связи с тем, что существующие источники электроэнергии могут терять вплоть до 35% своей мощности, расходуя её на тепловое излучение, а современные солнечные элементы имеют очень низкую эффективность преобразования в ближнем ИК диапазоне, доля которого составляет почти половину от всего солнечного потока. Более того, технологии, позволяющие объединять сложные материалы в мультикомпонентные ячейки для создания фотовольтаических преобразователей энергии в широком диапазоне излучения, являются дорогостоящими, а полученные устройства имеют жёсткие температурные ограничения.

Таким образом, необходимым является создание новых структур и исследование альтернативных материалов, обладающих термофотовольтаическими свойствами в широком спектре излучения и высоким КПД.

Для решения данной задачи было предложено исследовать свойства наноструктурированных тонких плёнок, состоящих из металлических частиц диаметром от 2 до 8 нм, упорядоченных по размеру. В такой изначально квазинейтральной системе должно возникать пространственное перераспределение заряда [1, 2]. Данное явление обусловлено, во-первых, тем, что уровень энергии Ферми в материале обладает зависимостью от размера частицы и количества свободных носителей заряда в ней, а во-вторых, на поверхности раздела контакта двух металлов с разными уровнями энергии Ферми происходит перераспределение электронов до состояния, когда данные уровни выровнены [3].

Данная работа посвящена поиску упрощенной модели электронной структуры металлических нанокластерных частиц и определению зависимости положения уровня энергии Ферми от их размера и количества атомов. Проведена качественная и количественная оценка предполагаемого перераспределения заряда, то есть, возникающей разности потенциалов на границе двух металлических нанокластерных частиц разных размеров, находящихся в контакте.

Список литературы

1. L.K. Grigor'eva, N.S. Lidorenko, E.L. Nagaev, S.P. Chizhik // *Sov. Phys. JETP* 64 (3), 620;
2. Э.Л. Нагаев, Малые металлические частицы, *УФН*. 162 (9) 49–124 (1992);
3. Н.Ашкрофт, Н.Мермин. *ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА*. Том 1. — Москва: Мир, 1979.

Д. С. КРЮЧКОВ¹, Г. А. ВИШНЯКОВА¹, К. С. КУДЕЯРОВ¹, Н. О. ЖАДНОВ¹, К.Ю. ХАБАРОВА^{1,2}, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ^{1,2}

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

³Российский квантовый центр, Москва, Россия

К СОЗДАНИЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОМПАКТНОГО ОПОРНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА НА ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЕ

Современная метрология времени и частоты во многом нацелена на переход к использованию оптических частот, что влечет за собой необходимость в разработке компактных и доступных лазерных источников с уровнем относительной нестабильности частоты менее 10^{-13} @ 0.1-10с, которые могут быть использованы в качестве опорных оптических осцилляторов. В данной работе исследуется лазерная система с активной стабилизацией частоты излучения по компактному 20-мм высокодобротному резонатору, изготовленному из ULE-стекла. Излучение стабилизированного по данному резонатору лазерного источника имеет ширину спектра 50 Гц @ 50 мс и относительную нестабильность $1.3 \cdot 10^{-13}$ @ 15 мс, подобная система может быть использована для передачи высокостабильных сигналов по оптическим и воздушным линиям связи, когерентной рефлектометрии, релятивистской геодезии, других приложений.

D.S. KRYUCHKOV¹, G.A. VISHNYAKOVA¹, K.S. KUDEYAROV¹, N.O. ZHADNOV¹, K.YU. KHABAROVA¹, N.N. KOLACHEVSKY^{1,2}

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

² Russian Quantum Center, village Skolkovo, Moscow, Russia

TOWARDS UNIVERSAL COMPACT REFERENCE OSCILLATOR AT OPTICAL FREQUENCY

Modern time and frequency metrology tends to broaden the use of an optical carrier, which requires development of compact and available lasers with an instability level below 10^{-13} @ 0.1-10 s for use as reference optical oscillators. In this paper we investigate a laser system with active frequency stabilization to the compact high-Q cavity made of ULE glass. The cavity-stabilized laser has a spectrum width of 50 Hz @ 50 ms and fractional instability of $1.3 \cdot 10^{-13}$ @ 15 ms, such systems can be used to transmit ultrastable signals with optical fiber and free space links, for reflectometry, relativistic geodesy, other applications.

Создание оптических реперов частоты, неточность и нестабильность которых находится на уровне единиц шестнадцатого знака, сейчас является более технической, нежели научной: существуют коммерчески доступные наборы компонентов для создания оптических реперов частоты [1] и готовые решения для программно-аппаратных комплексов управления ими. Однако характеристика созданного репера частоты требует его сличения со стандартом частоты, обладающим стабильностью и точностью того же порядка [2], для чего необходима передача высокостабильных сигналов с сохранением их характеристик. На уровне нестабильности сигнала порядка 16-го знака вклад в шумы от существующих радиочастотных методов передачи становится определяющим [3] и для решения этой проблемы необходимо передавать фазу оптической несущей [4], что уже находит широкое применение в формировании национальных и международных шкал времени [5], геодезии [6], астрономии [7], телекоммуникациях [8]. В этих задачах лазерные системы выступают в роли ультрастабильного локального осциллятора на оптической частоте, что, вместе с системой активной компенсации фазовых шумов канала, позволяет осуществлять когерентную передачу сигнала на большие расстояния [9]. Соотношение длины когерентности излучения лазера L_{coh} и длины оптического канала L должно удовлетворять условию $L_{coh} \gg 2L$ [10]. В случае протяженных линий необходима дополнительная стабилизация лазера, наиболее оптимальной реализацией которой служит активная подстройка частоты его излучения к собственному резонансу внешнего опорного интерферометра Фабри-Перо методом Паунда-Драйвера-Холла [11].

Данная работа посвящена созданию и характеристике компактного резонатора из стекла со сверхнизким коэффициентом теплового расширения с диэлектрическими высокоотражающими зеркалами для длины волны 1550 нм, на которой поглощение в стандартном оптическом волокне не превышает 0.23 дБ/км. Описаны особенности конструкции резонатора и вакуумной камеры, измерены его ключевые характеристики, исследованы характеристики лазерной системы, стабилизированной по этому резонатору: ширина спектра составила 50 Гц на времени 50 мс, относительная нестабильность частоты излучения – $1.3 \cdot 10^{-13}$ на времени усреднения 15 мс. Подобные резонаторы могут быть использованы для создания компактных лазерных систем для использования в широком круге задач, не требующих рекордных показателей точности и стабильности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-72-10166.

Список литературы

1. www.menlosystems.com/products/quantum-laser-systems/fc1500-quantum/
2. Gray, J. E. et al, Opt. Express, 20(10), 10617 (2012).
3. Riehle, F. Optical clock networks. Nature Photonics, 11(1), 25–31 (2017).
4. Ma, L.-S et al, Optics Letters, 19(21), 1777 (1994).
5. Milner, W. R. et al, Physical Review Letters, 123(17), 173201 (2019).
6. Takano, T. et al, Nature Photonics, 10(10), 662–666 (2019).
7. Karpathakis, S. F. E. et al, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 6(04), 1–9 (2020).
8. Dix-Matthews, B. P. et al, IEEE Communications Letters, 25(5), 1610–1614 (2021).
9. Droste, S. et al, Physical Review Letters, 111(11), 110801 (2013).
10. Kuderyarov, K. S. et al, Laser Physics, 28(10), 1–6 (2018).
11. Drever, R. W. P. et al, Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry, 31(2), 97–105 (1983).

У. Н. КУРЕЛЬЧУК

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ СПЕКТРОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОБРАТНО РАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Рассчитаны спектры REELS обратно рассеянных электронов от холодных решеток благородных газов, исследованы электронные свойства этих решеток.

U.N. KURELCHUK

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

THEORETICAL PREDICTION OF THE REEL SPECTRA OF THE CRYSTALLINE RARE GAS LATTICES

The REELS spectra of backscattered electrons from cold noble gas lattices are calculated, and the electronic properties of these lattices are studied.

Низкоэнергетический (8,2 эВ) долгоживущий изомер в ядре ^{229}Th является уникальным в ядерной физике, что дает толчок к исследованиям таких инноваций, как сверхточные ядерные часы, ядерный гамма-лазер оптического диапазона и ядерный светодиод. Все эти устройства работают на ионах тория, имплантированных в диэлектрическую матрицу с большой шириной запрещенной зоны. Если ширина запрещенной зоны подложки превышает энергию ядерного перехода, то отсутствуют эффективные каналы для безызлучательного распада изомера тория, остается только фотоэмиссионный.

Проведены теоретические расчеты спектров характеристических потерь обратно рассеянных под малым углом электронов (REELS) в кристаллических решетках инертных газов Ne, Ar, Xe, сконденсированных на подложках из золота при температурах 5 - 20 К. Была рассчитана электронная структура основного состояния для ГЦК и ГПУ фаз методом теории функционала плотности с применением GW-коррекции собственных энергий. Ширина запрещенной зоны составила: Ne - 21,5 эВ, Ar — 14,3 эВ, Xe — 9,6 эВ.

REELS рассчитывались из полученной электронной структуры как в приближении независимых электронов, так и включая эффекты многочастичных возмущений - электронно-дырочные пары ($e - h$), диэлектрическое экранирование локального поля и экситоны. Показано, что для всех решеток инертных газов экситонные эффекты в большой степени определяют структуру характеристических потерь электронов, экситонные пики в REELS наблюдаются на 1-3 эВ ниже энергии, соответствующей ширине запрещенной зоны.

Таким образом, показано, что холодные решетки благородных газов Ar и Ne являются широкозонными диэлектриками - поэтому они могут использоваться в эксперименте по исследованию низколежащего (8,2 эВ) изомерного перехода в ядре ^{228}Th . Многочастичные эффекты в таких решетках существенно влияют на их электронные и оптические процессы, что должно быть учтено в ториевом эксперименте.

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

В работе рассматривается сбор основных информационных сведений об исследуемых радионавигационных системах осуществлялся с помощью исследования характеристик, технической документации выбранных систем, а также анализа современных научных источников по проблеме исследования.

P.M.MATYAKUBOVA, B.A. ZHUMAMURATOV
Tashkent State Technical University, Uzbekistan, Tashkent city

ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF MODERN SATELLITE SYSTEMS

The paper considers the collection of basic information about the studied radio navigation systems was carried out with the help of a study of the characteristics, technical documentation of the selected systems, as well as an analysis of modern scientific sources on the research problem.

Навигационные технологии в современном мире находятся на таком уровне развития, который, прежде всего, позволяет их использовать в разных областях и сферах деятельности. На сегодняшний день достаточно широким считается спектр использования радионавигационных приборов и систем. Радионавигационные приборы и системы в мировой практике нашли собственное применение в гражданской и военной авиации, управлении наземным транспортом, судоходстве и т.д. [8, с. 21].

В последние годы развитие методов и средств радионавигационного обеспечения осуществляется в повышенной интенсивности, усилении требований к надежности, точности и объему сведений, а также оперативности обработки таких сведений [3, с. 105]. Именно поэтому требуется выбор наиболее эффективных радионавигационных приборов и систем, который возможен благодаря квалитетическому анализу их характеристик.

Для проведения в рамках настоящего исследования квалитетического анализа характеристик радионавигационных приборов на основе показателей качества радионавигационных приборов сначала было проведено ранжирование по балльной шкале их основных характеристик. На основе проведенного балльного ранжирования была проведена квалитетическая оценка качества радионавигационных приборов по следующим критериям:

- Критерий Гурвица.
- Критерий Сэвиджа.
- Критерий Вальда.
- Критерий Лапласа.

По совокупности полученных критериальных расчетов был определен наилучший вариант радионавигационного прибора.

В процессе исследования проводился анализ характеристик радионавигационных приборов Galileo, GPS и ГЛОНАСС. Рассмотрим их более подробно.

1. Galileo. Данная система представляет собой проект спутниковой системы навигации. Назначением системы считается решение задач навигационного характера для подвижных объектов с точностью до 1 метра. Как отмечается в современных научных исследованиях, Galileo выступает глобальным и уникальным проектом системы массового обслуживания современности [1, с. 121].

2. GPS. Данная радионавигационная система разработана для Министерства обороны США, которое и осуществляет управление ей. Основным назначением радионавигационной системы считается определение потребительских координат с высокой точностью, которые составляют вектора скорости, а также привязка их к системной временной шкале.

- Радионавигационная система GPS включает в себя следующие основные сегменты:
- потребительский сегмент;
 - командно-измерительный наземный комплекс;
 - космический сегмент [7, с. 124].

3. ГЛОНАСС – это главная российская радионавигационная система, целью которой считается определение точного времени, скорости движения и местоположения сухопутных, воздушных, морских транспортных средств и иных разновидностей потребителей [2, с. 294].

Чтобы провести квалитетический анализ классифицированы радионавигационные приборы по основным принципам их работы и их характеристики были сведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики радионавигационных приборов

Характеристики	ГЛОНАСС	Galileo	GPS
Используемая частота	1575,6 МГц	1575,42 МГц	1575,42 МГц
Радиус орбиты	19100,0 км	29378,137 км	26561,75 км
Наклон орбитальных плоскостей	64 °	54 °	53 - 56 °

Разделение спутников по орбитальным плоскостям	Равномерное	Равномерное	Неравномерное
Количество орбитальных плоскостей	3	3	6
Количество спутников	28	30	27

Представим в таблице 2 ранжирование основных характеристик радионавигационных приборов по балльной шкале (1-10, где 1 – наихудшее, 10 – наилучшее).

Классификация радионавигационных приборов по основным принципам их работы представлена схематически на рисунке 1 [3].



Рис. 1. Классификация радионавигационных приборов по основным принципам их работы

Таблица 2. Ранжирование основных характеристик радионавигационных приборов

Характеристики	ГЛОНАСС	Galileo	GPS
Используемая частота	10	9	9
Радиус орбиты	7	9	10
Наклон орбитальных плоскостей	8	9	9
Разделение спутников по орбитальным плоскостям	10	10	9
Количество орбитальных плоскостей	7	7	10
Количество спутников	9	10	8

Согласно данным, отраженным в таблице 2, требуется построить матрицу с целью проведения дальнейшего анализа (таблица 3).

Таблица 3. Матрица для анализа

10	7	8	10	7	9
9	9	9	10	7	10
9	10	9	9	10	8

На основе представленной матрицы рассчитаем критерии Гурвица, Сэвиджа, Вальда, Лапласа.

1. Критерий Лапласа, как отмечается в исследовании Д.В. Шиманчука, ориентируется на принцип недостаточного основания. Согласно данному принципу, пишет исследователь, так как неизвестно распределение вероятностей конкретных состояний, нет причин считать такие вероятности различными. Именно поэтому требуется использовать оптимистическое предположение, что вероятности равны между собой. Определяется критерий по формуле (1) [11]:

$$\max_i \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \right) \quad (1)$$

Опираясь на представленную в таблице 3 матрицу, а также используя формулу (1) рассчитаем критерий Лапласа:

$$\max_i \left(\frac{51}{6}; \frac{54}{6}; \frac{55}{6} \right) = \frac{55}{6}$$

Данные расчета свидетельствуют о том, что наибольшее значение математического ожидания «выигрыша» по характеристикам радионавигационных приборов наблюдается у системы GPS.

2. Критерий Вальда, как отмечается в работе Л.С. Крутовой, является критерием гарантированного выигрыша. Ученый пишет, что использование данного критерия позволяет определить, в каком случае объект принимают наиболее выигрышную линию поведения. Определяется критерий по формуле (2) [5, с. 195]:

$$\max_i (\min_j a_{ij}) \tag{2}$$

Опираясь на представленную в таблице 3 матрицу, а также используя формулу (2) рассчитаем критерий Вальда:

$$\max_i (7; 7; 8) = 8$$

Данные расчета свидетельствуют о том, что гарантированно «выигрышным» объектом по характеристикам радионавигационных приборов выступает система GPS.

3. Критерий Сэвиджа. В работе М.А. Халикова и А.Ю. Кухаренко отмечается, что данный критерий считается одним из критериев принятия в условиях неопределенности решений. Ученые отмечают, что расчет критерия позволяет найти наиболее лучшее решение из вариантов решений в условиях неопределенности. Определяется критерий по формуле (3) [6, с. 64]:

$$\min_i (\max_j r_{ij}) \tag{3}$$

Однако, прежде чем перейти к расчету критерия Сэвиджа требуется построить матрицу разницы балльных оценок, для этого используем формулу (4)

$$r_{ij} = \max_i a_{ij} - a_{ij} \tag{4}$$

Представим матрицу разницы балльных оценок в таблице 4.

Таблица 4. Матрица разницы балльных оценок

0	3	2	0	3	1
1	1	1	0	3	1
1	0	1	1	0	2

Опираясь на представленную в таблице 4 матрицу, а также используя формулу (3) рассчитаем критерий Сэвиджа:

$$\min_i (3; 3; 2)$$

Согласно полученным данным, наиболее лучшее решение из вариантов решений в условиях неопределенности - система GPS.

4. Критерий Гурвица. Д.В. Фошин в собственном исследовании отмечает, что критерий является критерием оптимальности чистых стратегий [10, с. 133]. В работе Л.Г. Лабскера представлена формула для определения критерия [7, с. 137]:

$$\max_i (\alpha \max_j a_{ij} + (1-\alpha) \min_j a_{ij}) \tag{5}$$

Рассчитаем критерий Гурвица:

$$\max_i (3\alpha + 7; 3\alpha + 7; 2\alpha + 8)$$

Используя полученные результаты, составим график оптимально-пессимистичного анализа по критерию Гурвица (рисунок 1).

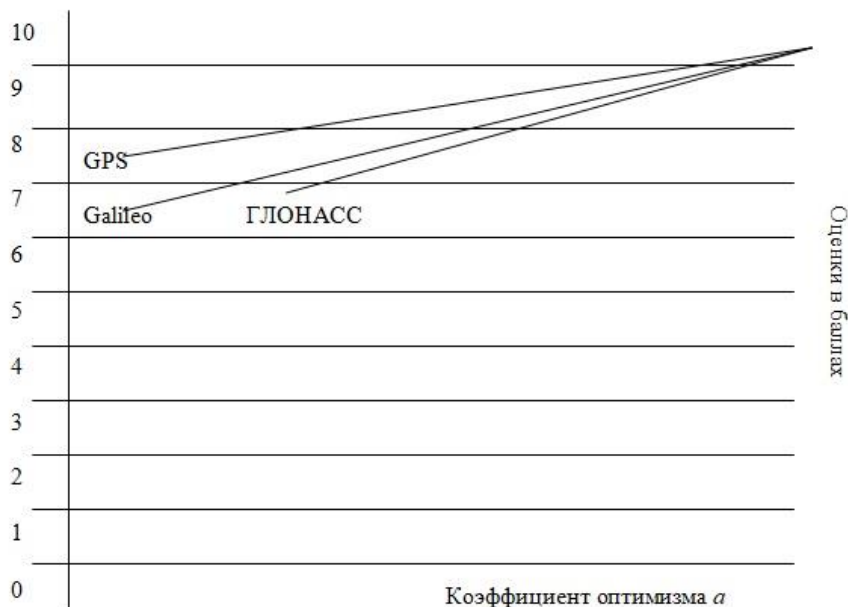


Рис. 1. График оптимально-пессимистичного анализа по критерию Гурвица

Расчеты критерия Гурвица свидетельствуют о том, что наилучшей является радионавигационная система GPS, так как она имеет самый меньший разброс значений, а также ее точка пессимистического ожидания выше.

Заключение

В процессе исследование мы провели квалиметрический анализ характеристик радионавигационных приборов Galileo, GPS и ГЛОНАСС. Для проведения такого анализа были использованы критерии Гурвица, Сэвиджа, Вальда, Лапласа. Данные, полученные в результате расчетов, свидетельствуют о том, что наилучшими характеристиками обладает радионавигационная система GPS.

Литература

1. Амиров А.Ж. Анализ существующих современных радионавигационных систем // Молодой ученый. 2015. № 21 (101). С. 120-122.
2. Гамишаев Р.А., Карцан И.Н. Радионавигационные системы и их классификация // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. №7. С. 293-295.
3. Eshmuradov D.E., Aytbayev T.A., Muhammedov A.U. Basic metrological characteristics of radio navigation devices. ELECTRONIC JOURNAL OF ACTUAL PROBLEMS OF MODERN SCIENCE, EDUCATION AND TRAINING. NOVEMBER, 15, 2021
4. Затучный Д.А., Сладь Ж.В. Использование информации об уровне наземного обеспечения полетов ВС для планирования воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 05. С. 104-110.
5. Крутова Л.С. Страхование экологических рисков с применением критерия Вальда // ГИАБ. 2019. №6. С. 193-205.
6. Кухаренко А.Ю., Халиков М.А. Выбор портфеля неинституционального инвестора с использованием критерия Вальда – Сэвиджа // Фундаментальные исследования. 2019. № 5. С. 62-68.
7. Лабскер Л.Г. К вопросу о проблеме сглаживания критерием Гурвица и экономическое приложение // Инновации и инвестиции. 2016. №6. С. 134-145.
8. Степаненко А.С. Развитие навигационных систем в гражданской авиации // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. №1. С. 123-131.
9. Сурков В.О. Анализ состава существующих систем навигации для подвижных наземных объектов и выбор наиболее перспективного состава, исходя из требований точности и надежности / В. О. Сурков. — Текст : непосредственный // Современные тенденции технических наук : материалы II Междунар. науч. конф. (г. Уфа, май 2013 г.). — Т. 0. — Уфа : Лето, 2013. — С. 20-24.
10. Фошин Д.В. Оптимальный выбор стратегии разработки нового программного обеспечения на основании обобщенного риск-критерия Гурвица // Инновации и инвестиции. 2016. №3. С. 131-137.
11. Шиманчук Д.В. Методы поддержки принятия решений. — СПб., 2013. URL: http://www.apmath.spbu.ru/ru/staff/shimanchuk/files/decision_support_methods_7.pdf (дата обращения: 31.10.2021).

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В работе анализируются средства интеллекта, возможности проведения целенаправленного отбора информации с целью обеспечения ее достоверности для адекватной оценки ситуации и принятия оптимального решения. Указаны основные причины приводящие к недостоверности информации при контроле и управлении качеством промышленной продукции, которыми являются: отсутствие возможности обеспечения объективности оценок; зашумленность данных; погрешности из-за неправильного выбора методов или средств их получения; случайные помехи искажения.

P.M.MATYAKUBOVA, G.G. BOBOEV, M.M.MAKHMUDJONOV
Tashkent State Technical University, Uzbekistan.

STUDY OF INTEGRATED CONTROL AND CONTROL TECHNOLOGIES

The paper analyzes the means of intelligence, the possibility of conducting a targeted selection of information in order to ensure its reliability for an adequate assessment of the situation and making the best decision. The main reasons leading to the unreliability of information in the control and management of the quality of industrial products are indicated, which are: the inability to ensure the objectivity of assessments; noisy data; errors due to the wrong choice of methods or means of obtaining them; random noise distortion.

В деятельности промышленных предприятий повышение эффективности производственных процессов реально достижимо за счет внедрения систем контроля качества готовой продукции, и пригодности технологических процессов, их интеграции с общим менеджментом качества и администрированием. Причины изменений качества бесчисленны и их воздействие различно. Некоторые из них сильно влияют на изменение качества, в то время как другие, теоретически считающиеся* важными, на самом деле не оказывают существенного воздействия, если должным образом контролируются. Существует много методов оценки качества. Некоторые полагаются на интуицию, другие опираются на прошлый опыт, третьи прибегают к статистическому анализу данных. Однако для повышения качества изделий важен не столько годами накопленный опыт, сколько сильное желание руководства к получению объективных оценок реальной производственной ситуации с использованием статистики и статистических методов. Их использование позволяет перейти к разработке новых технологий контроля качества производственных процессов. Многие ведущие фирмы стремятся к их активному использованию, и некоторые из них тратят более ста часов ежегодно на обучение этим методам, осуществляемое в рамках самой фирмы. Хотя знание статистических методов - часть нормы, само знание еще не означает умения применить его. Способность рассматривать события с точки зрения статистики, важнее, чем знание самих методов.

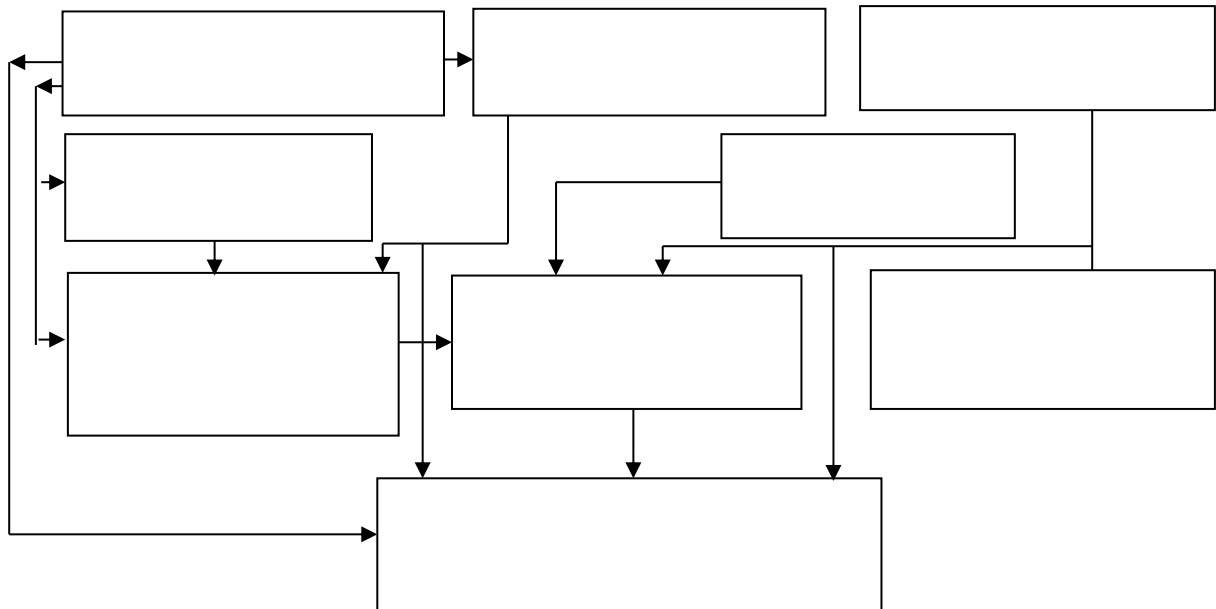
Одним из путей повышения эффективности функционирования измерителей качества сыпучих материалов является разработка концептуальных основ и их практическая реализация при построении гибких, адаптивных систем, способных к обучению и самообучению, самонастройке и оперативной перестройке, принимающих решения и оценивающих их достоверность, т.е. систем, обладающих элементами искусственного интеллекта.

Появившееся в последнее время понятие интеллектуального датчика (Smart Sensor) определяет измерительные системы, обладающие сложной пятиуровневой иерархической структурой. На первом уровне происходит преобразование физического явления в электрический сигнал, на втором - осуществляется компенсация воздействия внешней среды (например, температурная коррекция, устранение электромагнитного воздействия и др.). Цифровая связь датчика с системы сбора данных или автоматического управления осуществляется на третьей ступени иерархии; при этом связь может быть двухсторонней. На четвертой ступени решаются вопросы, связанные с автоматической диагностикой датчика. Наконец, пятый уровень относится к управлению: датчик снабжен переключающими устройствами и вырабатывает управляющие воздействия.

С использованием возможностей искусственного интеллекта создается сеть, объединяющая несколько датчиков, позволяющих измерять отдельные физические и химические параметры, а также экспертную систему, в которой хранятся сведения, соответствующие субъективным ощущениям человека. Первый этап в создании таких сетей - сбор данных - является наиболее трудоемким процессом; второй - состоит в обучении процессора сети с искусственным интеллектом способам обработки накопленной на первом этапе информации. В результате обучения процессор должен уметь определять взаимосвязь измеряемых параметров и качественные показатели конечной продукции. Наконец, на третьем этапе проводятся испытания и оценка сети.

На рис. 1 приведена структурная схема использования элементов и алгоритмов интеллектуальной поддержки при автоматизации технологий контроля и управления качеством сыпучих материалов.

Оценка качества и прогнозирование надежности предполагает наличие следующей последовательности действий: измерение характеристик сыпучих материалов (выявление исходной ситуации), анализ полученных данных с целью принятия решения о качестве объекта контроля и формирование заключения (прогнозирование исхода). В процессе управления качеством продукции последовательность действий аналогична: анализ текущей ситуации, оценка возможных событий и исходов. В общем случае имеет цепь отображения вида: ситуация \Rightarrow событие \Rightarrow исход.



Важнейшее средство интеллекта - возможность проведения целенаправленного отбора информации с целью обеспечения ее достоверности для адекватной оценки ситуации и принятия оптимального решения. Основными причинами факта существования недостоверности информации при контроле и управлении качеством промышленной продукции являются: отсутствие возможности обеспечения объективности оценок; зашумленность данных; погрешности из-за неправильного выбора методов или средств их получения; случайные помехи искажения и т.д.

При этом для минимизации вероятности использования недостоверной информации необходим ее предварительный отбор, или фильтрация. Это особенно злободневно в системах искусственного интеллекта.

В работе выполнена содержательная постановка задачи прогнозирования характеристик стохастического процесса в терминах стохастической теории оптимального оценивания. Пусть имеется производственный процесс, текущее состояние которого в момент времени i может быть описано n -мерным случайным вектором $X_i (i = \overline{1, l})$. Наблюдение за процессом в момент времени j может быть представленным в виде m -мерного вектора $Z_j (j = \overline{1, l})$, статистически связанного с вектором состояния. Пусть определена последовательность наблюдений $Z_j (j = \overline{1, l})$.

Требуется определить оценку вектора состояния \hat{Y}_S для некоторого заданного S -го момента времени, если X_0 недоступна непосредственному наблюдению.

Прогнозируемый процесс в виде многомерной дискретной системы, переход которой из i -го состояния в $(i+1)$ -ое описывается многомерным разностным уравнением:

$$x_{(i+1)} = A_{i,(i+1)}x_i + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где A_i - известная матрица перехода размерности $(n \times n)$; X_i - вектор-столбец фазовых координат в i -ый момент времени размерности $(n \times 1)$; ε_i - вектор-столбец аддитивных помех размерности $(n \times 1)$.

Это уравнение позволяет получать экстраполированные оценки вектора состояния в $(i+1)$ -ый момент, если известны предыдущие оценки

$$\hat{X}_{(i+1)} = A_{i,(i+1)}\hat{X}_i. \quad (2)$$

Система, характеризующая оптимальный прогнозирующий фильтр калмановского типа, который обеспечивает получение оценок параметров прогнозируемого процесса по минимуму обобщенной дисперсии ошибок (минимум следа ковариационной матрицы), выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{i+1} &= A_{i,(i+1)}\hat{x}_i^+, \\ k_{(i+1)} &= A_{i,(i+1)}k_i^+A_{i,(i+1)} + \sum_{n=1}^s A_{(n+1),(i+s)}Q_{(i+n-1)}A_{(i+n),i}^T \end{aligned} \quad (3)$$

Прогнозирующий фильтр не накладывает никаких ограничений на вид законов распределения помех ε и σ . Достаточно лишь, чтобы были заданы два первых начальных момента.

Обобщенная форма квазиоптимального фильтра, когда постановка задачи прогнозируется в условиях априорной неопределенности модели процесса предполагает нахождение оценок параметров объекта с произвольно заданным интервалом упреждения $s \geq 1$ при использовании предикатора любого порядка, имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{(i+s)} &= \left\{ \prod_{j=1}^s A_{(i+s),(i+s-j+1)} \right\} \hat{x}_i^+ - B_{i,(i+s)} \hat{x}_i^+, \\ x_{(i+s)} &= Q_{i,(i+s)} k_i^+ B^T Q_{i,(i+s)} + \sum_{j=1}^s B_{(i+j),(i+s)} Q_{(i+j-1)} B_{(i-1),(i+s)}^T \\ \hat{x}_i^+ &= \hat{x}_i + F_i (Z_i - D_i \hat{x}_i), \\ k_i^+ &= k_i - k_i D_i^T (R_i + D_i k_i D_i^T)^{-1} D_i k_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Чтобы получить прогнозируемое состояние процесса $Y_{(i+s)}$, необходимо ввести в рассмотрение новый вектор переменных X повышенной размерности и, используя выражения (4), найти значение $\hat{x}_{(i+s)}$. Из полученного вектора $\hat{x}_{(i+s)}$ можно выделить искомый вектор состояния процесса $Y_{(i+s)}$.

Задача статистического синтеза оптимальных алгоритмов обработки первичной измерительной информации с учетом «старения» информации и динамики изменения модели в работе рассмотрена применительно к случаям геометрического и арифметического сглаживания. Решение задачи дает следующие выражения для дисперсии оценки:

$$\begin{aligned} D(\hat{X}) &= \delta^2 \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^n} \\ \tilde{D}_{Г.С.} &= \frac{D(\hat{X})}{\delta^2} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{1+\alpha^n}{1-\alpha^n} \end{aligned} \quad (5)$$

где α - постоянная сглаживания.

Как видим,

$$\min \frac{D(\hat{X})}{\delta} = \frac{1}{n} \quad (6)$$

Таким образом, метод геометрического сглаживания, являющийся конечномерным аналогом экспоненциального сглаживания, применяется для выборки ограниченного объема, а условие несмещенности оценки выполняется для любых объемов выборки.

Средний «возраст» в скользящей средней равен среднему «возрастов» всех отдельных измерений:

$$\rho_{ССС.} = \frac{M-1}{2} \quad (7)$$

При геометрическом сглаживании средний «возраст» измерений определяется в виде:

$$\begin{aligned} \rho_{Г.С.} &= \left\{ \sum (n-k) \alpha^{n-k} \right\} \frac{1-\alpha}{1-\alpha^n} \cdot \frac{1-\alpha^{n-1}}{1-\alpha^n} - (n-1) \frac{\alpha^n}{1-\alpha^n}; \\ \lim \rho_{Г.С.} &= \frac{n-1}{2}, \\ \lim \rho_{Г.С.} &= \frac{1}{1-\alpha}. \end{aligned} \quad (8)$$

$\alpha \rightarrow \infty$

В работе рассмотрены вопросы построения дифференциаторов первого, второго и выше порядка, обеспечивающих требуемую точность при дифференцировании измерительных сигналов, наблюдаемых на фоне разнообразных помех. Показано, что решение задачи получения высококачественных производных может быть выполнено на основе использования метода квазиоптимальной фильтрации. Осуществлен сравнительный анализ погрешностей адаптивных и оценка погрешностей неадаптивных дифференциаторов первого и второго порядка и показано, что первые отличаются высокой помехоустойчивостью, удовлетворительно работают при уровнях помехи, равных или превышающих уровень полезного сигнала, причем, отношение «сигнал/помеха» на выходе адаптивных дифференциаторов практически не изменяется при колебаниях уровня помехи в широких пределах. Кроме того, адаптивные дифференциаторы подавляют случайные помехи, уровень которых изменяется со скоростью, при которой дифференциатор успевает перестроить свои параметры; причем, время перестройки в основном определяется быстродействием аналого-цифрового преобразователя. Помехоустойчивость адаптивных дифференциаторов остается высокой и в том случае, когда существенные частоты спектров полезного сигнала и помехи расположены достаточно близко.

Литература

1. Algorithms for increasing the reliability of primary measurement information. Matyakubova, P.M., Ismatullayev, P.R., Avezova, N.I., Mahmadjonov, M. Journal of Physics: Conference Series this link is disabled, 2021, 2036(1), 012002

2. Assessment and investigation of measurement uncertainty of standard samples of substances and materials in physicochemical measurements based on standard test methods. Masharipov, Sh.M., Ruzmatov, K.R., Rahmatullayev, S.A., Mahmudjonov, M.M., Isaqov, A.G. *Journal of Physics: Conference Series* [this link is disabled](#), 2021, 2094(5), 052011
3. Study of the main parameters of the capacitive converter. Matyakubova, P.M., Zhabborov, Kh.Sh., Kadirova, Sh.A., Mahmudjonov, M.M. *Journal of Physics: Conference Series* [this link is disabled](#), 2021, 2036(1), 012001.
4. Experimental quantification of measurement uncertainty and other verification criteria for analytical test methods. Miralieva, A.K., Rashidov, A.S., Ernazarova, Z.X., Masharipov, Sh.M., Mirpayziyeva, G.M. *Journal of Physics: Conference Series* [this link is disabled](#), 2021, 2094(5), 052031
5. Published under licence by IOP Publishing Ltd. Methods for monitoring metrological characteristics of scientific and physical parameters of intelligent sensors in real operating conditions. Matyakubova P.M, Masharipov SH.M., Ruzmatov K.R, Sultanov M.K. *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1889, Cybernetics, economics and information measuring systems* Citation Parahat M Matyakubova et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1889 032037.
6. A Comparative Analysis of Amplitude and Phase Methods for Measuring the Moisture Content of Materials in the Grain Drying Process Flow. Matyakubova, P.M., Ismatullaev, P.R., Kuluev, R.R. *Journal of Engineering Physics and Thermophysicsthis link is disabled*, 2021, 94(2), pp. 408–414
7. Mathematical model of a heat transducer with a cylindrical heat pipeline and with a focused heat source. Avezova, N.I., Ismatullaev, P.R., Matyakubova, P.M., Kodirova, Sh.A. *Journal of Physics: Conference Series* [this link is disabled](#), 2020, 1686(1), 012063
8. Multifunctional Heat Converter Moisture Content of Liquid Materials. Avezova, N.I, Ismatullayev, P.R, Matyakubova, P.M, Boboyev, G.G. *International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019* [this link is disabled](#), 2019, 9012041
9. Ways to Develop Innovative Processes in Grain Production. Avezova, N.I, Matyakubova, P.M, Boboyev, G.G. *International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019* [this link is disabled](#), 2019, 9012034
10. Multifunctional Information and Measuring Complex for Controlling the Parameters of Fibrous Materials and Dispersed Media. Masharipov, S.M., Azimov, R.K. *Measurement Techniquetthis link is disabled*, 2017, 60(6), pp. 643–646
11. Yusupbekov N.R., Gulyamov S.M., Eshmatova B.I., Mukhamedkhanov U.T. A study of electrochemical converter for a system measuring the concentration of harmful substances in gas mixtures of the paper // *International Journal of Psychosocial Rehabilitation* 24(3), c. 240-246. DOI: 10.37200/IJPR/V24I3/PR200775.
12. Yusupbekov N., Adilov F., Ergashev F. Development and improvement of systems of automation and management of technological processes and manufactures // *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems* 11(3), c.53-57. DOI: 10.14313/JAMRIS_3-2017/28.
13. Yusupbekov, N.R., Gulyamov, S.M., Kasimov, S.S., Usmanova, N.B. Knowledge-based planning for industrial automation systems: The way to support decision making // *Advances in Intelligent Systems and Computing* 896, c. 873-879. DOI: 10.1007/978-3-030-04164-9 115.
14. Yusupbekov, NR; Adilov, FT; Gulamov, SM; Zaynutdinova, MB, Optimization of simulation models of technological systems and facilities // *ICEMI'2003: Proceedings Of The Sixth International Conference On Electronic Measurement & Instruments, Vols 1-3 in 2003.*

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ WINDOWS УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДОПУСТИМОГО НОРМИ НАЛИЧИЕ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ

В данной статье приводятся количественные описания газов, которые в настоящее время требуются для использования человеком, но могут быть вредны для здоровья, а также работы, выполненные на основе принципа действия, алгоритмов и результатов программного обеспечения для измерения этих газов. Кроме того, имеются структурные схемы современных газоанализаторов, находящихся в эксплуатации в настоящее время.

P.M.MATYAKUBOVA¹, M.M.MAHMUDJONOV²

PERMISSIBLE NORM FOR TOXIC GASES THAT CAN BE SPREAD IN THE AIR AND SOFTWARE FOR WINDOWS OPERATING SYSTEM DESIGNED TO MEASURE IT

This article provides quantitative descriptions of gases that are currently required for human use but may be harmful to health, as well as the work done on the basis of the principle of operation, algorithms and results of software for measuring these gases. In addition, there are block diagrams of modern gas analyzers currently in operation.

At present, the analysis of gases and their contents, the study of their distribution in the air is one of the most important processes. In the history of mankind, the use of combustible gases as fuel is considered to be the most convenient source of energy, among other gases. These include Methane (CH₄), Ethane (C₂H₆) and Prapane (C₃H₈), which are easy to produce and inexpensive fuels. Therefore, such gases are used as fuel by the population on the surface. Just as there are several advantages to using such gases as fuel, there are also disadvantages. For example, the risk of explosion when used, excessive amount in the air is harmful to human health. Combustion of such gases during combustion produces carbon dioxide, and the amount of concentration of several such gases in the air in the context of the impact on human health is given in Table 1 on the basis of ГОСТ 30494-2011.

Table 1. Examples of pollution content in outdoor air

Locality	Air concentration			
	CO ₂ , см ³ /м ³	CO, мг/м ³	NO ₂ , кг/м ³	SO ₂ , мкг/м ³
Rural area, no significant sources	350	1	5-35	5
Small town	375	1-3	15-40	5-15
Polluted city center	400	2-6	30-80	10-50

Therefore, such gases should be constantly measured and monitored. Tashkent State Technical University is conducting a number of research projects in this area. Examples include “Metrology, Technical Regulation, Standardization and Certification” for the measurement of airborne harmful gases.

There are many ways to measure gases, the most common of which are:

- thermocatalytic
- thermoconductive
- semiconductor
- electrochemical
- galvanic
- infrared (optical)
- interferometric
- photoionization (PID)
- pyrolytic
- photometric

Each of these has its own advantages and disadvantages. At present, the block diagram of modern measuring instruments consists of 1 sensing element, 2 secondary converters, 3 ATSP, data editing blocks, 4 command blocks and 5 indicators (Figure 1).

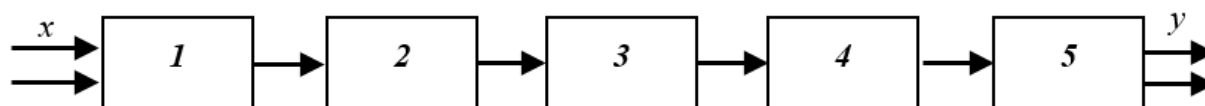


Figure1: Block diagram of an intelligent measuring instrument

The use of modern information technologies in the analysis of these data is of great importance to researchers. At present, it is not possible to engrave the results of any measuring instrument without connecting it to computer technology, so there is a need to study the created or can be created gas analyzers by connecting them to computer technology (Figure 2).

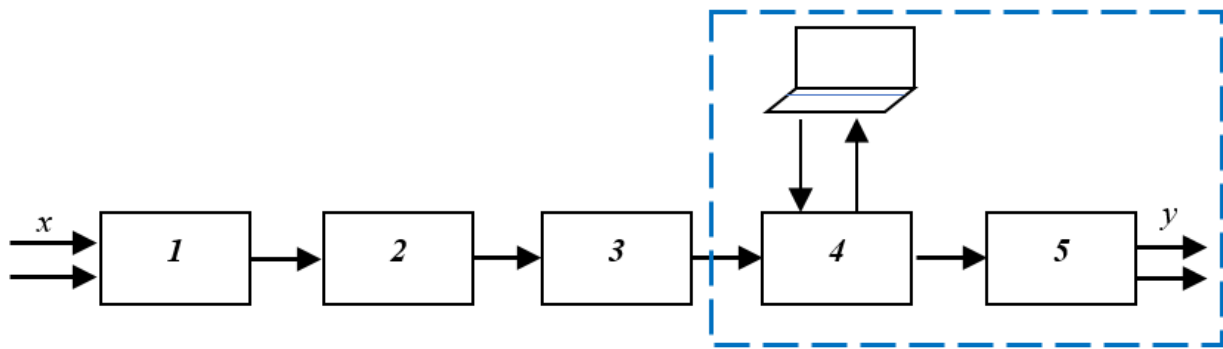


Figure 2. Block diagram of an intelligent measuring instrument connected to computer technology.

Special software systems will be needed to connect devices designed to measure toxic gases in the air to computer technology. The purpose of the work in the existing software languages is to monitor the timing of the release of toxic gases, its amount and the status of excess in accordance with the requirements of the standard ГOCT 30494-2011, where long-term monitoring of a particular environment is required. The software proposed by the researchers of Tashkent State Technical University works on the basis of the following algorithm (Figure 3).

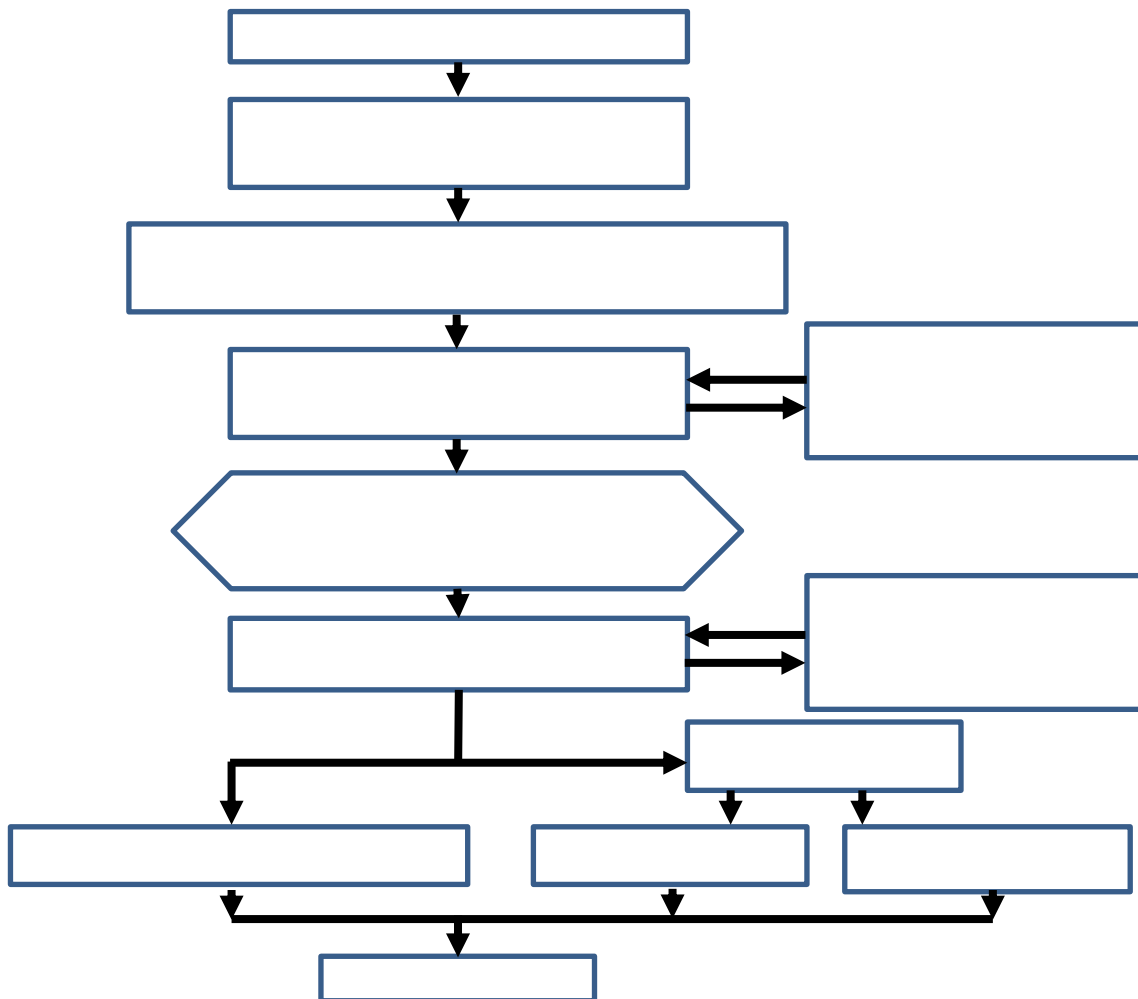


Figure 3. Software algorithm for gas analyzer based on checking compliance with the requirements of the interstate standard ГOCT 30494-2011.

For this software was issued a certificate of official registration (Figure 4) for electronic computers, registered by the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan under the number № DGU 13104, the authors of the software Matyakubova P.M. and Mahmudjonov M.M.



Figure 4. Certificate of official registration of software by the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan.

References:

1. Assessment and investigation of measurement uncertainty of standard samples of substances and materials in physicochemical measurements based on standard test methods. Masharipov, Sh.M., Ruzmatov, K.R., Rahmatullayev, S.A., Mahmudjonov, M.M., Isaqov, A.G. *Journal of Physics: Conference Series*this link is disabled, 2021, 2094(5), 052011
2. Study of the main parameters of the capacitive converter. Matyakubova, P.M., Zhabborov, Kh.Sh., Kadirova, Sh.A., Mahmudjonov, M.M. *Journal of Physics: Conference Series*this link is disabled, 2021, 2036(1), 012001.
3. Experimental quantification of measurement uncertainty and other verification criteria for analytical test methods. Miraliev, A.K., Rashidov, A.S., Ernazarova, Z.X., Masharipov, Sh.M., Mirpayzayeva, G.M. *Journal of Physics: Conference Series*this link is disabled, 2021, 2094(5), 052031
4. Published under licence by IOP Publishing Ltd. Methods for monitoring metrological characteristics of scientific and physical parameters of intelligent sensors in real operating conditions. Matyakubova P.M, Masharipov SH.M., Ruzmatov K.R, Sultanov M.K.. *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1889, Cybernetics, economics and information measuring systems*Citation Parahat M Matyakubova et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1889 032037.
5. A Comparative Analysis of Amplitude and Phase Methods for Measuring the Moisture Content of Materials in the Grain Drying Process Flow. Matyakubova, P.M., Ismatullaev, P.R., Kuluev, R.R. *Journal of Engineering Physics and Thermophysicsthis link is disabled, 2021, 94(2), pp. 408–414*
6. Mathematical model of a heat transducer with a cylindrical heat pipeline and with a focused heat source. Avezova, N.I., Ismatullaev, P.R., Matyakubova, P.M., Kodirova, Sh.A. *Journal of Physics: Conference Series*this link is disabled, 2020, 1686(1), 012063
7. Multifunctional Heat Converter Moisture Content of Liquid Materials. Avezova, N.I, Ismatullayev, P.R, Matyakubova, P.M, Boboyev, G.G. *International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019*this link is disabled, 2019, 9012041
8. Ways to Develop Innovative Processes in Grain Production. Avezova, N.I, Matyakubova, P.M, Boboyev, G.G. *International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019*this link is disabled, 2019, 9012034
9. Multifunctional Information and Measuring Complex for Controlling the Parameters of Fibrous Materials and Dispersed Media. Masharipov, S.M., Azimov, R.K. *Measurement Techniquesthis link is disabled, 2017, 60(6), pp. 643–646*

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО СТАНДАРТА ISO/IEC 17025:2017 И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСЫ ПО МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Статья посвящена метрологическим требованиям ISO/IEC 17025:2017 новой версии действующего международного стандарта, созданной после рассмотрения более трех тысяч замечаний и предложений по его модификации, в которой обновлена структура, сфера применения уточнена и дополнена, обновлены справочные документы, скорректирована терминология. Данная статья направлена на разработку научно-методических рекомендаций по метрологическим требованиям стандарта ISO/IEC 17025:2019 и его применению на практике. В то же время в новой версии анализируются некоторые проблемы обеспечения достоверности результатов измерений, гармонизации нормативных и технических документов с международными стандартами, метрологическими требованиями, калибровкой средств измерений, единиц измерения и другими метрологическими требованиями стандарта. Разработаны научно-методические рекомендации для лабораторий, действующих или претендующих на подтверждение своей компетенции. Стандарт стал международным эталоном для испытаний, а также для калибровочных лабораторий, которые обеспечивают более надежные и достоверные результаты.

MASHARIPOV SHODLIK MASHARIPOVICH¹, MAVLYANOV MAMURJON ANVAROVICH²,
ABDUMAJIDOV ISLOMJON BAHODIRJON OGLI²

¹Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent city.

²State enterprise "Uzbek national institute of metrology"

METROLOGICAL REQUIREMENTS OF INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC 17025:2017 AND EXPERIMENTAL STUDY QUESTIONS ON METROLOGICAL TRACEABILITY OF MEASUREMENT RESULTS

The article is devoted to the metrological requirements of ISO/IEC 17025:2017 of the new version of the current international standard, created after considering more than three thousand comments and proposals for its modification, in which the structure was updated, the scope of application was clarified and expanded, reference documents were updated, terminology was adjusted. This article is aimed at developing scientific and methodological recommendations on the metrological requirements of ISO/IEC 17025:2019 and its application in practice. At the same time, the new version analyzes some problems of ensuring the reliability of measurement results, harmonization of regulatory and technical documents with international standards, metrological requirements, calibration of measuring instruments, units of measurement and other metrological requirements of the standard. Scientific and methodological recommendations have been developed for laboratories operating or claiming to confirm their competence. The standard has become an international benchmark for testing, as well as for calibration laboratories, which provide more reliable and reliable results.

Introduction

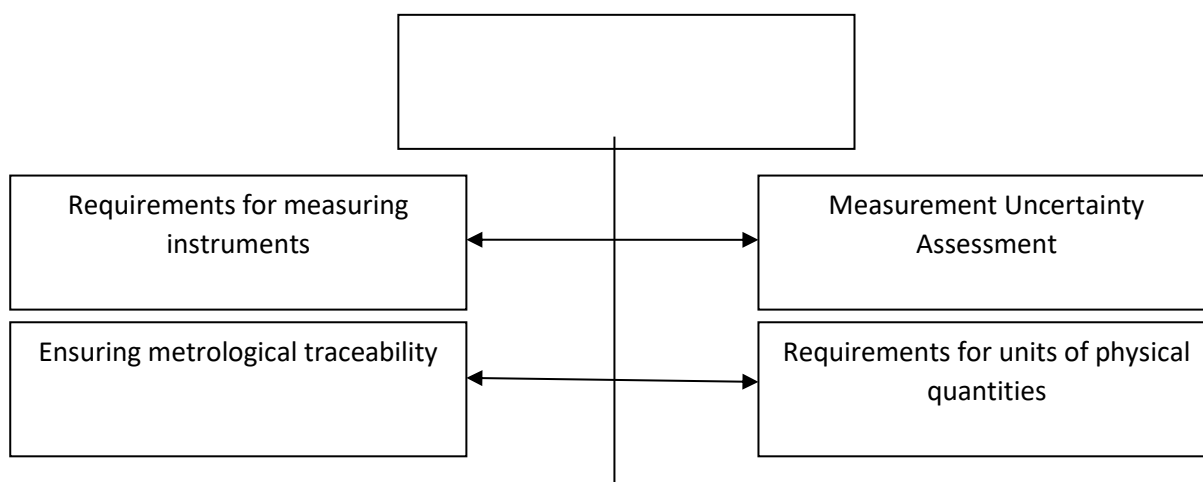
The increasing attention of consumers is aimed at obtaining a high-quality service or product. Laboratory testing organizations play an important role in this process. A potential consumer who wants to receive a service in a test center or a separate laboratory first looks at its accreditation, and how the company is guided in the provision of the service. For laboratories in the Republic of Uzbekistan, which takes into account these requirements, first of all, is the national standard O'z DSt ISO/IEC 17025:2019 "General requirements for the competence of test and calibration laboratories" [1]. Compliance of the laboratory activities with the requirements of O'z DSt ISO/IEC 17025:2019 means that the laboratory meets the requirements for both technical competence and the management system. If the laboratory meets these requirements, it follows that it guarantees its customer compliance with the conditions for obtaining reliable test results [2-5].

The decision of the Uzstandart Agency of 09.09.2019 No. 05-1056 in the republic adopted the state standard O'z DSt ISO/IEC 17025:2019, identical to the international standard ISO/IEC 17025:2017 "General requirements for the competence of test and calibration laboratories," instead of O'z DSt ISO/IEC 17025:2007 [1].

This article deals primarily with the metrological requirements of this standard.

Materials and methods

The metrological requirements of this standard can be divided into the following groups (Figure 1).



Product Compliance Decision
Rules

Figure 1. Classification of the main metrological requirements of the international standard ISO/IEC 17025:2017

Results and Discussion

Requirements for measuring instruments

According to paragraph 6.4.1. O'z DSt ISO/IEC 17025:2019: “The laboratory shall have access to equipment (including, but not limited to, measuring instruments, software, measurement standards, reference materials, reference data, reagents, consumables or auxiliary apparatus) that is required for the correct performance of laboratory activities and that can influence the results” [1].

The laboratory has a documented procedure defining the order, requirements, operating and maintenance conditions of the equipment used, as well as relevant records in accordance with paragraph 6.4 of the O'z DSt ISO/IEC 17025:2019 standard. Other issues related to this standard have been investigated and discussed in these sources [2-8].

2. According to paragraphs 6.4.4 and 6.4.6 of the standard O'z DSt ISO/IEC 17025:2019, the laboratory documentation describes the procedure for checking compliance with the established requirements and calibrating laboratory equipment.

Define in these documents:

a) in accordance with paragraph 6.4.4 of the standard, to check all laboratory equipment for compliance with the established requirements before putting it into operation;

b) for which of all available laboratory equipment it is necessary to calibrate and establish calibration intervals taking into account the requirements of the ILAC-G24 [9], based on the test methods specified in the accreditation area, according to the requirements of paragraph 6.4.6.

Specify the range when calibrating the equipment used, taking into account the test conditions, according to the methods specified in the accreditation area.

For example: The laboratory has scales with a measuring range from 0 to 1000 g, the test method provides for weighing a sample weighing (200 ± 5) g. Then, it is enough for the laboratory to calibrate the scales in the required range of (200 ± 5) g and reduce the cost of calibration services.

During the study, the study covered 947 types of measuring and testing instruments, devices, stands, installations and devices used by test laboratories in the country and as a result, as of December 15 of this year:

- calibration of 315 types (models) of measuring and testing instruments has been mastered;
- A schedule for the implementation of calibration of 151 types of measuring and testing instruments has been developed;
- 323 types of devices do not require calibration;
- it is recommended, in accordance with the Methodological Guidelines for demonstration of metrological traceability in test laboratories [10] (hereinafter referred to as Methodological Guidelines), to perform verification or certification of 68 types (models) of measuring and testing instruments;
- 40 types of devices are designed for testing using measuring instruments (tests), the metrological characteristics of which are reconfigured before each measurement or regularly in short periods. The calibration of the measuring instrument (s), which require a reference value to be set using a standard sample or other measuring instruments (internal calibration - in-house calibration) before the tests are performed, can be carried out by the test laboratory itself (the fourth case of the Methodological Guidelines);
- 17 types of test instruments are used as a single device and since it is not possible to dismantle the measuring instruments included in it, it is advisable to carry out work according to the Methodological Instructions described in the fifth case;
- for 33 types of measuring instruments due to the lack of working standards in the country today, it is recommended to use the services of foreign metrological institutes.

The above results of the analysis are adopted taking into account the functions (assignments) of the equipment set forth in the most popular test methods, as well as on the basis of opinions expressed by foreign experts, based on ISO/IEC Guide 99:2007, ILAC-P10:07/2020, ILAC-G8:09/2019 and other international standards, guidelines.

It should be noted separately that the issue of calibration, verification or certification of each measuring and testing instrument in service should be reviewed taking into account the specifics of the test method used.

If it is noted that the results obtained by means of measurement and testing affect the accuracy and validity of the tests, or if they are used for the purposes required to demonstrate metrological traceability, they must be calibrated.

Ensuring metrological traceability

Accredited laboratories and accredited laboratories shall demonstrate metrological traceability to the International SI System in accordance with ISO/IEC 17025:2017 and ISO 15189:2012. Accredited laboratories and laboratories applying for accreditation that do not provide metrological traceability are considered as not demonstrating technical competence in accordance with the above requirements. All equipment used for testing and/or calibration, including auxiliary measurement equipment (e.g. for environmental conditions) that has a significant impact on the accuracy or reliability of the test, calibration or sampling results, shall be calibrated.

The National Accreditation Body for ensuring metrological traceability recognizes the results of calibration performed by: accredited calibration laboratories of the Republic of Uzbekistan providing appropriate calibration; - national metrological institutes (hereinafter - NMI) of foreign countries, if their services meet the current needs for calibration (taking into account ranges and uncertainty of measurements) and are included in the database on key comparisons (hereinafter - KCDB), Note - KCDB is available on the BIPM website (<https://www.bipm.org/kcdb/>). - in the absence of the possibility of calibration in

the Republic of Uzbekistan, calibration laboratories of foreign countries, accredited accreditation bodies, signatories of ILAC MRA or other regional agreement recognized by ILAC. Figures 2 and 3 show the experimental work on calibration of the analytical scale PTY-B1200 and their actual metrological characteristics.

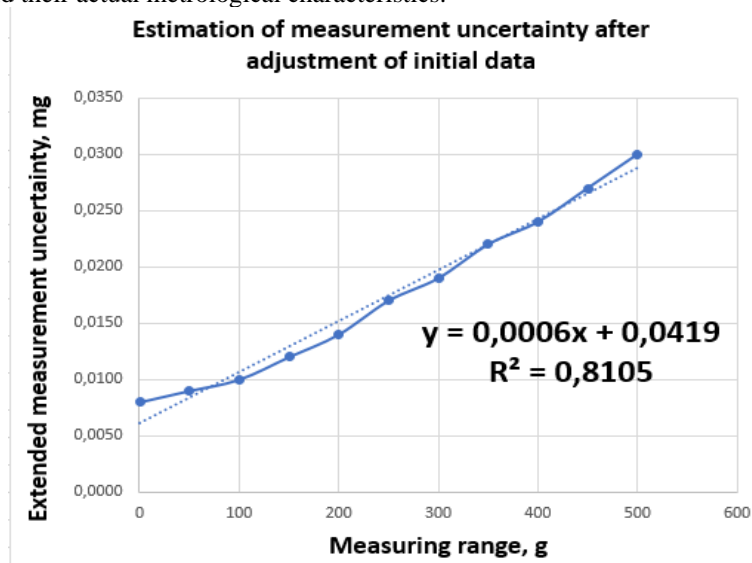


Figure 2. Results of calibration of electronic weight measuring device PTY-B1200

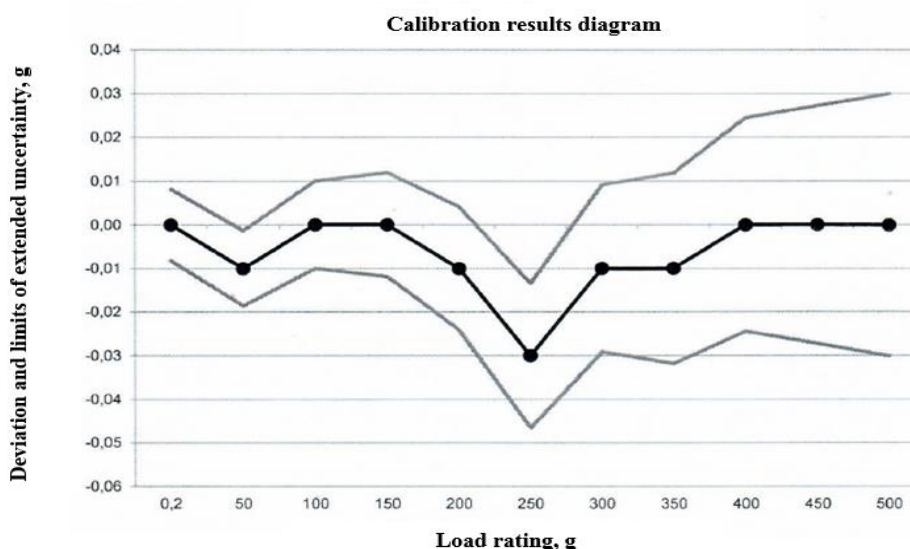


Figure 3. Calibration results diagram for all calibration points of the meter

The national accreditation body recognizes the traceable values: - certified standard samples assigned by the NMI of foreign countries included in the KCDB BIPM; - certified standard samples made by the competent supplier, in the presence of certificates that indicate the uncertainty of measurements. Suppliers meeting the requirements of ISO 17034:2016 "General requirements for the competence of manufacturers of standard samples" shall be considered competent; Note: Compliance with the requirements of ISO 17034:2016 can be confirmed by accreditation, evaluation by a third party, by self-assessment.

Measurement uncertainty assessment

In accordance with O'z DSt ISO/IEC 17025:2019 (7.6) and O'z DSt ISO 15189:2019 (5.5) laboratories should evaluate measurement uncertainty. Measurement Uncertainty Assessment conducted in accordance with GUM and/or O'z DSt 8.043: 2017 (ISO Guide 35:2006, MOD) "Standard Samples. General and statistical principles certification (certification)". Uncertainty can be expressed:

- a single value that applies to the entire range measurements;
- range. In this case the calibration laboratory is required have an appropriate assumption for interpolation to determine Uncertainty for intermediate values
- function of measured value/parameter;
- matrix where uncertainty values depend on values measured value, and from other parameters;
- graphical representation providing resolution ability on each coordinate axis to obtain at least two significant digits of uncertainty (after comma).

Knowledge of uncertainty of test results important for laboratories, their customers and all stakeholders, using and interpreting these results. When measurements are repeated or compared, it is important to consider measurement uncertainty. This is especially true when results are shall be communicated taking into account the limits of the specification, regulations,

regulatory documents. Comparability of results can usually be determined if measurement uncertainty is taken into account. This is the case when multiple laboratories measured the same test object parameter (sample) or when the laboratory regularly measures the parameter followed by monitoring is under way.

Uzbekistan currently has several standards on measurement uncertainty, for example:

- O'z DSt 8.070:2018 The State system for ensuring the unity of measurements of the Republic of Uzbekistan. Application of measurement uncertainty in test and measurement laboratories.

- O'z DSt 8.055:2017 The State system for ensuring the unity of measurements of the Republic of Uzbekistan. Assessment of uncertainty of measurement results of measurement methods;

- GOST 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 Uncertainty of measurement. Part 1. Introduction to guides on the expression of uncertainty in measurement.

Requirements for units of physical quantities

Procedure for application of unit of physical quantities is regulated by legal act [11]. In the Republic of Uzbekistan, units of quantities of the International System of Units (SI) are allowed in accordance with the established procedure. The name of units of quantities, designation, rules for their spelling and application are approved by the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan on the proposal of the Uzstandart Agency. The Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan may allow the use of units not included in the International System of Units. Other units of quantities may be used in the performance of foreign trade activities in accordance with the terms of the contract.

Product compliance decision rules

The declaration of conformity and the decision-making rules are two issues that have been discussed since the revision of ISO/IEC 17025. New requirements have become more stringent, experts formalize inconsistencies, and people have many questions about how to fulfill these requirements. Many organizations provide training on this topic, and the ILAC-G8 manual has been updated to help laboratories meet the requirements of the fundamental standard. However, the problem is that the current manuals and manuals are overloaded with more information than most laboratories need to meet the requirements of the customer and ISO/IEC 17025. The basic standards for rules of conformity decision are regulated by international standards [12-13].

Conclusions

The full implementation of the international standard ISO/IEC 17025 requires maximum harmonization of national standards and legal acts in the field of metrology. And also plays an important role in improving the qualifications of metrologists of accredited laboratories, taking into account international requirements. In addition, in practice, there is a shortage of competent manufacturers of standard samples under ISO 17034. To solve this problem, it is recommended to support local manufacturers claiming recognition under ISO 17034. As well as expanding the calibration capabilities of the National Metrological Institute, solve the problems of calibrating the measuring instruments of domestic laboratories.

References:

1. ISO/IEC 17025-2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
2. [Miraliyeva, A.K., Rashidov, A.S., Ernazarova, Z.X., Masharipov, Sh.M., Mirpayziyeva, G.M.](#) Experimental quantification of measurement uncertainty and other verification criteria for analytical test methods. [Journal of Physics: Conference Series this link is disabled](#), 2021, 2094(5), 052031 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/5/052031/pdf>
3. [Masharipov, Sh.M., Ruzmatov, K.R., Rahmatullayev, S.A., ...Mahmudjonov, M.M., Isaqov, A.G.](#) Assessment and investigation of measurement uncertainty of standard samples of substances and materials in physicochemical measurements based on standard test methods. [Journal of Physics: Conference Series this link is disabled](#), 2021, 2094(5), 052011 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/5/052011/pdf>
4. [Masharipov, S.M., Azimov, R.K.](#) Multifunctional Information and Measuring Complex for Controlling the Parameters of Fibrous Materials and Dispersed Media [Measurement Techniquethis link is disabled](#), 2017, 60(6), стр. 643–646 <https://www.springerprofessional.de/en/multifunctional-information-and-measuring-complex-for-controllin/15100128>
5. Matyakubova P.M., Masharipov SH.M., Ruzmatov K.R., Sultanov M.K.. Published under licence by IOP Publishing Ltd. Methods for monitoring metrological characteristics of scientific and physical parameters of intelligent sensors in real operating conditions. [Journal of Physics: Conference Series, Volume 1889, Cybernetics, economics and information measuring systems](#) Citation Parahat M Matyakubova et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1889 032037
6. Matyakubova, P.M., Ismatullayev, P.R., Avezova, N.I., Mahmudjonov, M. Algorithms for increasing the reliability of primary measurement information. [Journal of Physics: Conference Series this link is disabled](#), 2021, 2036(1), 012002
7. Masharipov, Sh.M., Ruzmatov, K.R., Rahmatullayev, S.A., ...Mahmudjonov, M.M., Isaqov, A.G. Assessment and investigation of measurement uncertainty of standard samples of substances and materials in physicochemical measurements based on standard test methods. [Journal of Physics: Conference Series this link is disabled](#), 2021, 2094(5), 052011
8. [Matyakubova, P.M., Zhabborov, Kh.Sh., Kadirova, Sh.A., Mahmudjonov, M.M.](#) Study of the main parameters of the capacitive converter. [Journal of Physics: Conference Series this link is disabled](#), 2021, 2036(1), 012001
9. ILAC-G24 Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments // <https://www.isobudgets.com/pdf/calibration-interval-analysis/ILAC-G24-2007-guidelines-for-the-determination-of-calibration-intervals-of-measuring-instruments.pdf>
10. www.nim.uz (official site State Enterprise "Uzbek national institute of metrology", Uzbek Agency for Technical Regulation
11. Decision of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan, dated 10.01.2018 No. 21, "ON THE USE OF UNITS OF QUANTITIES IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN"
12. JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. © JCGM 2012.
13. http://www.coomet.org/DB/isapi/cmt_docs/2017/12/7HHG12.pdf
14. [ILAC G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity](#)

Д.И. ПРОВОРЧЕНКО¹, Д.А. МИШИН¹, Д.О. ТРЕГУБОВ¹, А.А. ГОЛОВИЗИН¹, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ¹

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук, Москва, Россия

²Российский квантовый центр, Сколково, Россия

МАГНИТО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА АТОМОВ ТУЛИЯ В КОМПАКТНОЙ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЕ БЕЗ ЗЕЕМАНОВСКОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРУЕМЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСОВ

Спроектирована и собрана компактная вакуумная камера без Зеемановского замедлителя для компактной версии оптических часов на основе нейтральных атомов тулия. Продемонстрирована первая стадия лазерного охлаждения атомов тулия в этой системе в различных конфигурациях с оптимизацией параметров эксперимента.

D.I. PROVORCHENKO, D.A. MISHIN, D.O. TREGUBOV, A.A. GOLOVIZIN, N.N. KOLACHEVSKY

¹Lebedev Physical Institute of RAS

²Russian Quantum Centetr, Skolkovo, Russia

MAGNETO-OPTICAL TRAP OF THULIUM ATOMS IN COMPACT VACUUM CHAMBER WITHOUT ZEEMAN SLOWER FOR TRANSPORTABLE OPTICAL CLOCK

The compact vacuum chamber for thulium optical clock was developed, without a Zeeman slower. The first stage cooling was performed, and all parameters were optimized for different configurations of the magneto-optical trap.

Оптические часы за последнее время значительно превзошли по своим характеристикам устройства, работающие в радиочастотном диапазоне. Это дает возможность использовать их для решения широкого круга задач, для некоторых из которых требуются транспортируемые устройства.

Одной из перспективных платформ для транспортируемых оптических часов являются нейтральные атомы тулия. Причиной этого является часовой переход на длине волны $\lambda = 1.14$ мкм с естественной шириной линии $\gamma = 1.2$ Гц. Сдвиги частоты этого перехода, связанные с различными факторами окружающей среды, либо малы, либо помогут быть подавлены с помощью специального протокола опроса атомов [1-2]. В результате, часы, основанные на этом переходе, не нуждаются в специальной экранировке от внешних воздействий, которая необходима для устройств на основе некоторых других нейтральных атомов. Это и обуславливает привлекательность нейтральных атомов тулия в качестве основы оптических часов.

Для построения транспортируемых оптических часов необходимо, в первую очередь, осуществить компактизацию вакуумной системы. Для решения этой задачи было решено отойти от использования классического Зеемановского замедлителя и расположить источник атомов близко (в 11 см) от области захвата [3]. Это позволяет захватывать атомы из большего телесного угла, что делает необязательным их предварительное замедление, а благодаря низкой чувствительности часового перехода к тепловому излучению окружения, это практически не вызывает сдвига его частоты. Использование встречного оптического пучка (по аналогии с Зеемановским замедлением) позволяет ещё больше увеличить количество захваченных атомов.

В данной работе описана новая вакуумная камера (объём порядка 5 литров) и лазерная система для реализации первой стадии лазерного охлаждения. Продемонстрирована реализация первой стадии охлаждения на длине волны 410.6 нм с захватом порядка 1 млн атомов напрямую из теплового пучка. Использование же дополнительного встречного оптического пучка позволяет увеличить число захваченных в магнито-оптическую ловушку атомов до 13 млн. Время жизни таких магнито-оптических ловушек составляет порядка 1 с. Полученные результаты позволяют реализовать вторую стадию охлаждения атомов для более эффективного перезахвата в оптическую решётку для дальнейшей спектроскопии атомов, и являются первым шагом для построения компактных оптических часов на основе атомов тулия.

Список литературы

1. Golovizin, A., et al. Nature communications 10.1 (2019): 1-8.
2. Golovizin, A., et al. Nature communications 12.1 (2021): 1-9.
3. Golovizin, A., et al. Optics Express 29.22 (2021): 36734-36744.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ АЗОТА НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСА КПП В ⁸⁷Rb

Получены зависимости параметра качества резонанса КПП от температуры в ячейках с азотом, аргоном и их смесью. По результатам исследования, при давлении буферных газов 30 Торр в ячейке, заполненной азотом, качество резонанса выше, чем в заполненной аргоном, а при давлении 60 Торр азот оказывает негативное влияние на метрологические характеристики.

K.M. SABAKAR¹, M.I. VASKOVSKAYA², E.A. TSYGANKOV², V.L. VELICHANSKIY^{1,2}, S.A. ZIBROV²

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

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

SPECIFICS OF NITROGEN INFLUENCE ON METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF CPT RESONANCE IN ⁸⁷Rb

Dependencies of quality parameter of CPT resonance on temperature were obtained in cells with nitrogen, argon and mixture of them. As a result, at buffer gas pressure of 30 torr quality of resonance is higher in cell filled with nitrogen, than argon. But at 60 torr nitrogen has a negative impact on metrological characteristics.

Создание малогабаритных атомных часов на основе резонанса КПП является перспективным направлением современной метрологии [1]. Главными характеристиками резонанса, определяющими стабильность часов на его основе, являются его ширина и отношение сигнала к шуму, которое зависит от контраста. Ширина резонанса КПП обратно пропорциональна времени релаксации когерентной непоглощающей суперпозиции, для увеличения которого ячейки с щелочным металлом заполняют буферным газом (БГ). Использование БГ одного типа приводит к зависимости частоты резонанса от температуры [2]. Ее подавление достигается при заполнении ячеек бинарной смесью газов, имеющих разные коэффициенты температурной зависимости, чаще всего, смесью аргона и азота.

Молекулярный азот тушит спонтанную флуоресценцию за счёт передачи энергии возбужденного состояния рубидия колебательным степеням свободы молекулы. Это позволяет сужать КПП резонанс, поскольку устранение спонтанного излучения увеличивает скорость релаксации суперпозиции состояний, формирующей резонанс. С другой стороны, теоретические оценки показывают, что при использовании циркулярно-поляризованного излучения высокое давление азота из-за того же механизма тушения может уменьшить эффективность перемешивания в возбужденном состоянии, увеличить долю атомов на паразитном крайнем магнитном подуровне, и в результате уменьшить контраст. Для экспериментальной оценки влияния эффектов тушения и перемешивания и сравнения их вкладов исследовались зависимости параметра качества резонанса q (отношения контраста к ширине резонанса) от температуры. Они представлены на рис.1.

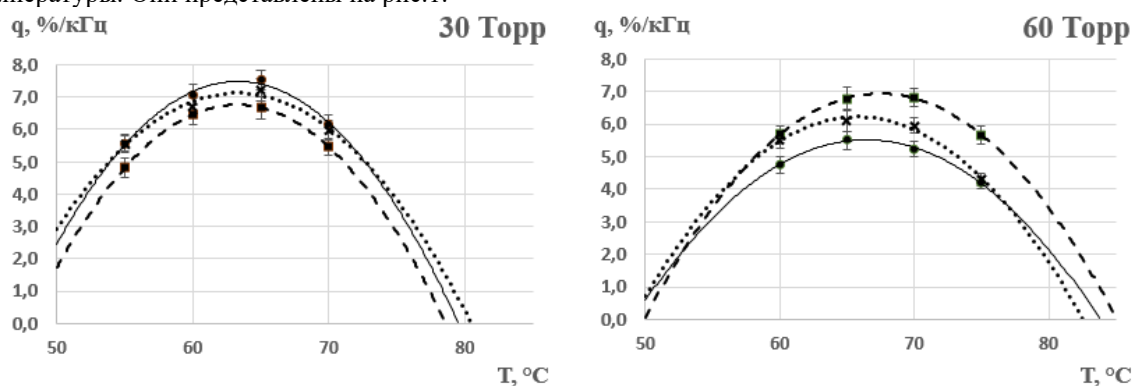


Рис. 1. Зависимость параметра качества резонанса КПП от температуры для ячеек с 30 и 60 Торр азота (сплошная линия), аргона (штриховая) и смеси аргона с азотом, обеспечивающей подавление температурной зависимости (пунктирная).

Видно, что при давлении 30 Торр параметр качества резонанса в азоте выше, чем в аргоне, т.е. эффект перемешивания состояний ещё не даёт преимущества. При давлении 60 Торр резонанс в аргоне становится больше на 20%. Таким образом, подтверждается предсказанное отрицательное влияние высокого давления азота, но эффект незначителен. Он может сильнее проявиться в ячейках малого размера, где рабочее давление БГ выше.

Список литературы

1. S. Knappe // Comprehensive microsystems. 2007. V. 3. P. 571-612.
2. J. Vanier, R. Kunski, N.Cyr, J.Y. Savard, M.Tetu // Journal of Applied Physics. 1982. V. 82. №8. P. 5387-5391.

БОРИСЮК П.В, ТЕЛЬНОВ Е.Ю, ПРОВОРЧЕНКО Д.И, ТРЕГУБОВ Д.О., ТРИЧЕВ К.К., ЧЕРЕПАНОВ П.А.,
ТКАЛЯ Е.В., КОЛАЧЕВСКИЙ Н.Н., СТРЕЛКИН С.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МАССПЕКТРОМЕТРИЯ И ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНОВ SR88+ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В ходе данной работы продемонстрировано улавливание и лазерное охлаждение ионов Sr88 + в квадрупольной ловушке Пауля линейной конфигурации. Была проведена масспектрометрия ионов различной зарядности, а также получена лазерная спектроскопия лямбда-схемы электронных переходов иона изотопа Sr88 +. Были получены изображения облака ионов и Вигнеровского кристалла. Это свидетельствует о возможности получения в нашей ловушке Вигнеровского кристалла изотопа Th232 3+, а также применении ионов Sr88 + для симпатического охлаждения ионов Th232 3+, а в дальнейшем и Th229 3+ для спектроскопии ядерного изомерного перехода.

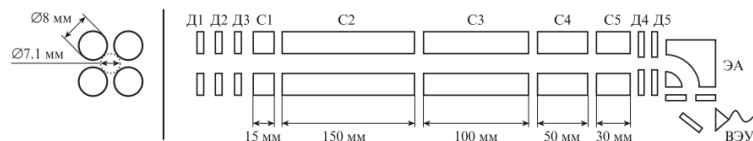
BORISYUK P. V., TELNOV E. YU, PROVINCENCE D.I, TREGUBOV D. O., TRICHEV K.K.,
CHEREPANOV P.A., TKALYA E.V., KOLACHEVSKY N.N., STRELKIN S.A.

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

MASS SPECTROMETRY AND LASER COOLING OF SR 88+ IONS IN A QUADRUPOLE PAUL TRAP OF LINEAR CONFIGURATION

In the course of this work, the capture and laser cooling of Sr88+ ions in a quadrupole Paul trap of linear configuration is demonstrated. The spectrometry of ions of various charges was carried out, and laser spectroscopy of the lambda scheme of electronic transitions of the ion of the isotope Sr88 + was obtained. Images of an ion cloud and a Wigner crystal were obtained. This testifies to the possibility of obtaining a Wigner crystal of Th232 3+ isotope in our trap, as well as the use of Sr88 + ions for sympathetic cooling of Th232 3+ ions, and later Th229 3+ for spectroscopy of the nuclear isomeric transition.

Квадрупольная ловушка Пауля линейной конфигурации состоит из четырех электродов.



Улавливание ионов осуществляется за счет подачи переменных потенциалов на электроды, на диагональные электроды подаются одинаковые потенциалы. Уравнение движения ионов в ловушке выглядит следующим образом.

$$\ddot{x} + \frac{e}{mr_0^2} (U - V \cos \Omega t) x = 0$$

$$\ddot{y} - \frac{e}{mr_0^2} (U - V \cos \Omega t) y = 0$$

Подбирая параметры потенциалов, можно добиться стабильности удержания ионов с детерминированным отношением массы к заряду.

Таким образом были получены масспектры ионов Sr, после лазерной абляции.

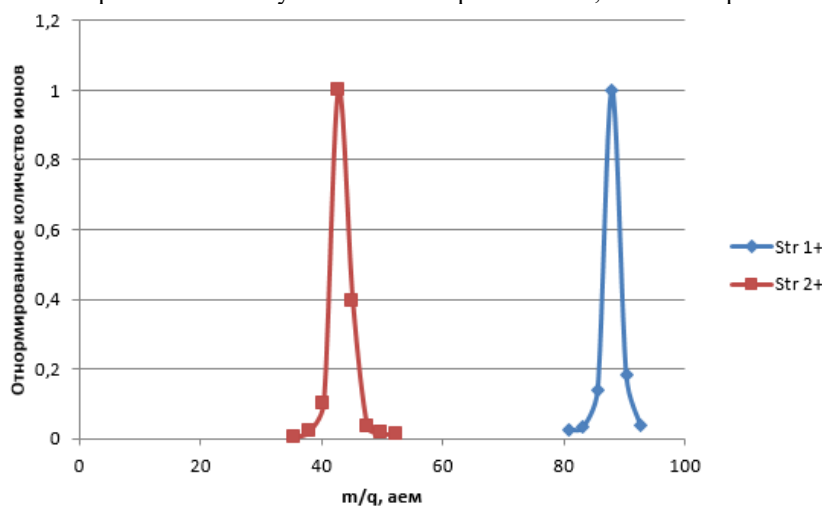


Рис.1 Масспектрометрия ионов Sr

Sr^+ имеет 88аеи, а Sr^{2+} - 44аеи, что согласуется с теорией. Таким образом мы можем разделять ионы различной зарядности в квадрупольной ловушке Пауля линейной конфигурации.

Для лазерного охлаждения Sr^+ была реализована следующая оптическая схема.

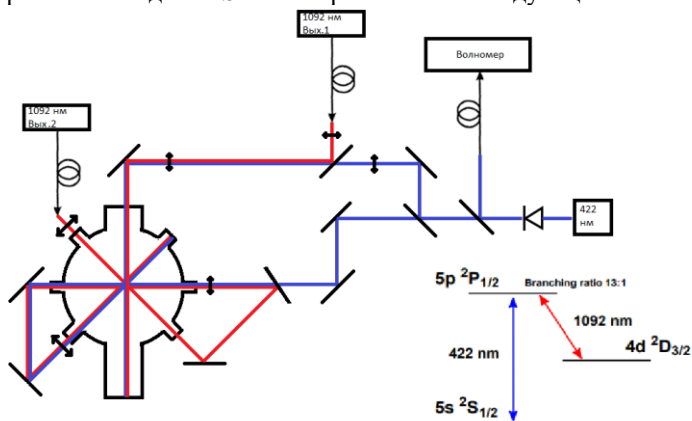


Рис.2 Оптическая схема лазерного охлаждения Sr^+ .

Таким образом были получены спектры лямбда схемы электронных переходов. Сигналом для спектроскопии являлось количество холодных ионов, полученных от сигнала с ВЭУ.

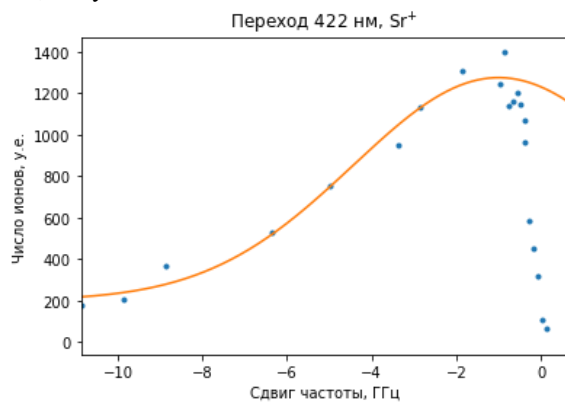


Рис.3 Спектроскопия 422 нм.

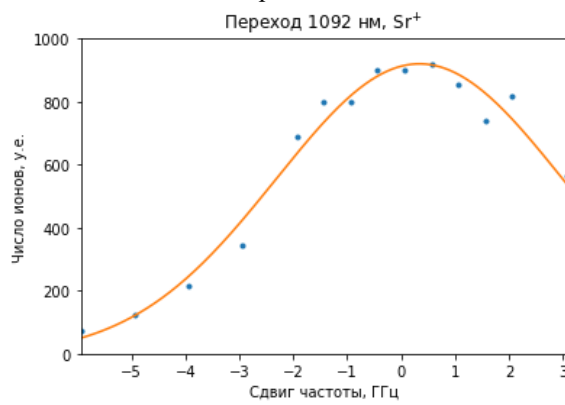


Рис.4 Спектроскопия 1092 нм.

Далее была получена фотография облака ионов Sr^+ .

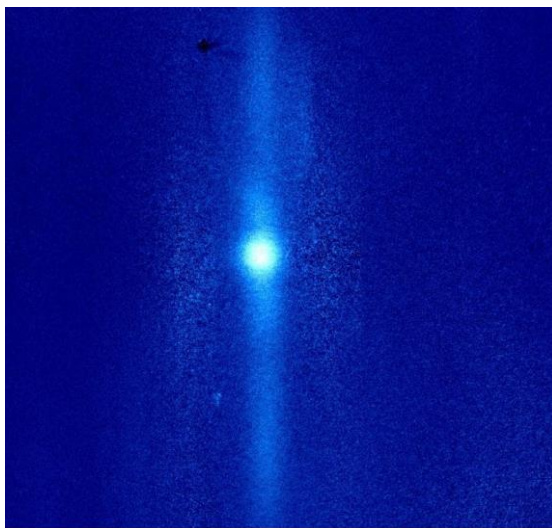


Рис. 5 Первая фотография облака ионов Sr.

После оптимизации параметров удержания ионов, геометрической оптимизации хода пучков лазеров и оптимизации оптики объектива камеры были получены фотографии ионного кристалла.

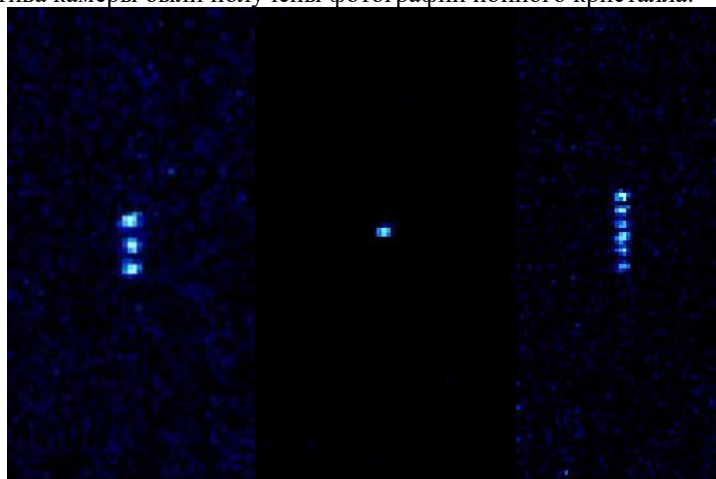


Рис. 6 Фотографии ионного кристалла Sr+.

БОРИСЮК П.В, ТЕЛНОВ Е.Ю, ПРОВОРЧЕНКО Д.И, ТРЕГУБОВ Д.О., ТРИЧЕВ К.К., ЧЕРЕПАНОВ П.А.,
ТКАЛЯ Е.В., КОЛАЧЕВСКИЙ Н.Н., СТРЕЛКИН С.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МАССПЕКТРОМЕТРИЯ ИОНОВ TH232 ВЫСОКОЙ ЗАРЯДНОСТИ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ И СИМПАТИЧЕСКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНОВ TH232 3+ ИОНАМИ SR+

В этой работе была продемонстрирована схема симпатического охлаждения различных ионов в линейной ловушке Пауля. Представленный метод не требует наличия специальных лазеров ионизации, а полагается на последовательную абляцию ионов ^{88}Sr и ионов другого типа, что делает его достаточно универсальным. Метод хотя и накладывает некоторые ограничения на отношение массы к заряду, тем не менее может быть применён для ряда ионов, которые используются в создании оптических часов или ионного квантового компьютера. Представленный принцип охлаждения был апробирован для симпатического охлаждения изотопов иона тория-232, которые планируется заменить на изотопы тория-229 для спектроскопии ядерного изомерного перехода.

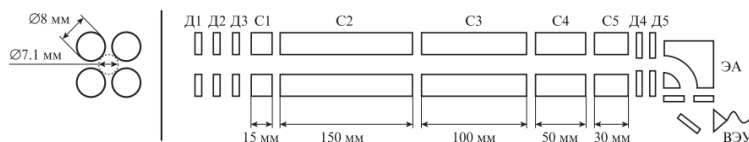
BORISYUK P. V., TELNOV E. YU, PROVINCENCE D.I, TREGUBOV D. O., TRICHEV K.K.,
CHEREPANOV P.A., TKALYA E.V., KOLACHEVSKY N.N., STRELKIN S.A.

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

MASS SPECTROMETRY OF HIGH-CHARGE TH232 IONS IN A LINEAR CONFIGURATION QUADRUPOLE PAUL TRAP AND SYMPATHETIC COOLING OF TH232 3+ IONS BY SR+ IONS

In this work, a scheme of sympathetic cooling of various ions in a linear Paul trap was demonstrated. The presented method does not require special ionization lasers, but relies on sequential ablation of ^{88}Sr ions and other types of ions, which makes it quite versatile. Although the method imposes some restrictions on the mass-to-charge ratio, it can nevertheless be applied to a number of ions that are used in the creation of an optical clock or an ion quantum computer. The presented cooling principle has been tested for sympathetic cooling of thorium-232 ion isotopes, which are planned to be replaced with thorium-229 isotopes for nuclear isomeric transition spectroscopy.

Квадрупольная ловушка Пауля линейной конфигурации состоит из четырех электродов.



Улавливание ионов осуществляется за счет подачи переменных потенциалов на электроды, на диагональные электроды подаются одинаковые потенциалы. Уравнение движения ионов в ловушке выглядит следующим образом.

$$\ddot{x} + \frac{e}{mr_0^2} (U - V \cos \Omega t) x = 0$$

$$\ddot{y} - \frac{e}{mr_0^2} (U - V \cos \Omega t) y = 0$$

Подбирая параметры потенциалов, можно добиться стабильности удержания ионов с детерминированным отношением массы к заряду.

Таким образом были получены масспектры ионов Sr и Th, после лазерной абляции.

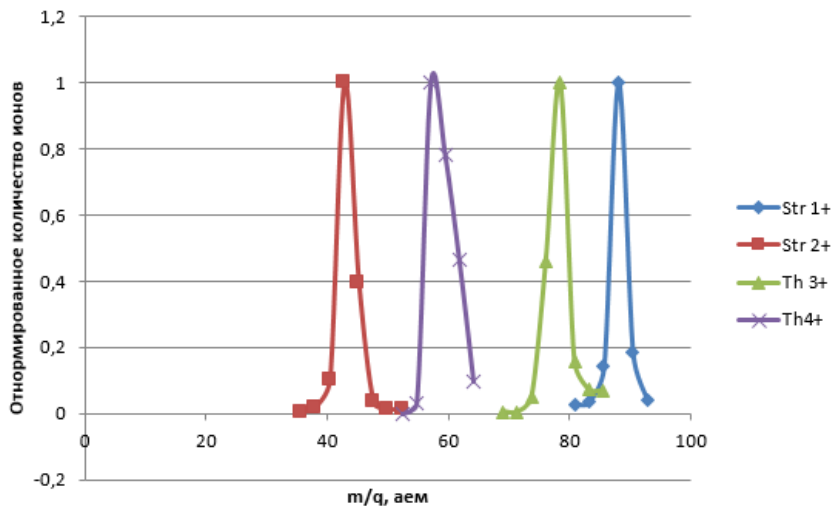


Рис. 1 Масспектрометрия ионов Sr и Th.

Sr⁺ имеет 88аеm, Sr²⁺ - 44аеm, Th⁴⁺ - 58аеm, а Th³⁺ - 77 аеm, что согласуется с теорией. Таким образом мы можем разделять различные ионы различной зарядности в квадрупольной ловушке Пауля линейной конфигурации.

Для лазерного охлаждения Sr⁺, а также последующего симпатического охлаждения и спектроскопии лямбда-схемы электронных переходов ионов Th³⁺ была реализована следующая оптическая схема.

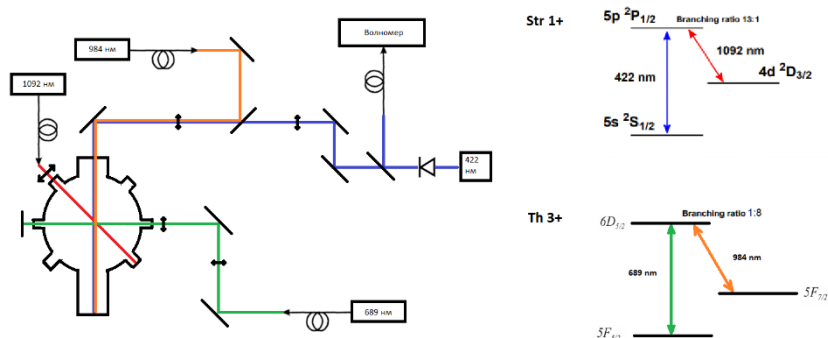


Рис. 2 Оптическая схема симпатического охлаждения ионов Th³⁺ ионами Sr⁺.

Ширина линий симпатического охлажденного Th³⁺ будет определяться Доплеровским уширением в зависимости от отстройки от резонанса Sr⁺.

Таким образом при отстройке 422 нм на 200 МГц был получен спектр 984 нм, при частоте лазера 689 нм 434291,5 ГГц. Синий график наблюдение засветки от Th³⁺, зеленый график от Sr⁺. По ОХ 0 соответствует частоте 304619,0 ГГц.

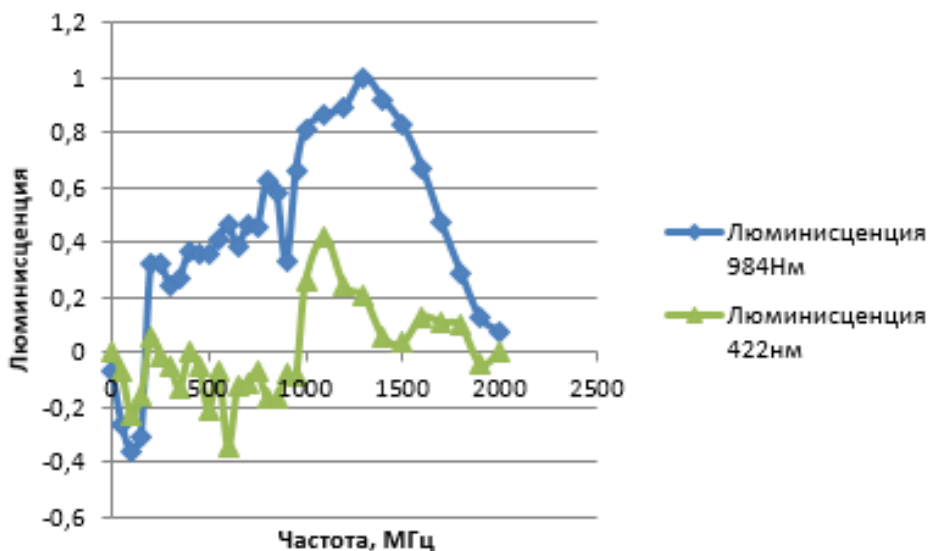


Рис. 3 Спектроскопия 984нм.

Д.О. ТРЕГУБОВ^{1,2}, А.А. ГОЛОВИЗИН¹, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО^{1,2}, Д.А. МИШИН¹, К.Ю. ХАБАРОВА¹, В.Н. СОРОКИН¹, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ¹

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО НАПЫЛЕНИЮ АТОМОВ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ РЕШЕТКУ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ

В рамках эксперимента по исследованию уширения часового перехода 1.14 мкм в атомах тулия, имплантированных в кристаллическую решётку благородных газов, была разработана вакуумная камера и методика напыления газа и атомов на подложку.

D.O. TREGUBOV^{1,2}, A.A. GOLOVIZIN¹, D.I. PROVORCHENKO^{1,2}, D.A. MISHIN¹, K.YU. KHABAROVA¹, V.N. SOROKIN¹, N.N. KOLACHEVSKY¹

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

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

EXPERIMENTAL SCHEME FOR THULIUM ATOMS IMPLANTATION IN NOBLE GAS CRYSTAL FOR SPECTROSCOPY

As part of the 1.14 μm transition spectroscopy experiments in thulium atoms implanted in solid, we developed a vacuum chamber together with implantation scheme of noble gas and thulium atoms on the cold surface.

Часовой переход на длине волны 1.14 мкм в атоме тулия обладает низкой чувствительностью к электрическим полям [1]. Это открывает возможности для исследования и использования свойств этого перехода не только в атомах в оптической решётке, но и для имплантированных в кристаллическую решётку. Обычно в твёрдом теле наблюдаются значительные уширения атомных переходов, но экспериментальные свидетельства аномально узкой линии перехода 1.14 мкм были продемонстрированы ранее в работах [2,3].

Особенностью исследований в нашей лаборатории является обширный инструментарий работы с рядом оптических переходов в атоме тулия в магнитооптической решётке, который применительно к твердотельному эксперименту позволит определять сдвиги и уширения с точностью, которая принципиально ограничена лишь работой оптических часов на атомах тулия. Для использования тех же самых лазеров дизайн вакуумной камеры должен подразумевать широкие возможности оптического доступа, при том, что само напыление атомов требует размещения в камере газовой трубки, тулиевой мишени и оптического доступа для лазера абляции.

Представленный дизайн камеры и схема имплантации атомов потенциально могут быть использованы и для исследования других элементов.

Работа поддержана Грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук № МК-2322.2022.1.2

Список литературы

1. Golovizin, A. et al. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift. Nat. Commun. 10, 1–8 (2018).
2. Gaire, V., Raman, C. S. & Parker, C. V. Subnanometer optical linewidth of thulium atoms in rare-gas crystals. APS 99, (2019).
3. Ishikawa, K. et al. Laser spectroscopy of thulium atoms implanted in liquid and solid 4 He. (1997).

В.А. ШИЛОВ, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕТОДИКА НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НАНОКЛАСТЕРОВ МЕТАЛЛОВ С ГРАДИЕНТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПО РАЗМЕРАМ

В данной работе была разработана методика получения тонких нанокластерных плёнок тантала на поверхности кремния. Нанокластеры формировались методом магнетронного осаждения из газовой фазы, их размеры контролировались при помощи квадрупольного масс-фильтра. Данным методом были получены кластерные плёнки с диаметром нанокластеров тантала от 1,5 нм до 15 нм на кремнии.

V.A. SHILOV, P.V. BORISUK, O.S. VASILIEV

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

THIN FILMS DEPOSITION OF METAL NANOCCLUSERS WITH A GRADIENT SIZE DISTRIBUTION

In this work, a technique for obtaining thin nanocluster films of tantalum on a silicon surface was developed. Nanoclusters were formed by magnetron vapor deposition, their sizes were controlled using a quadrupole mass filter, their sizes were controlled using a quadrupole mass filter. This method was used to obtain cluster films with a diameter of tantalum nanoclusters from 1.5 nm to 15 nm on silicon.

В настоящее время создание термо-фотовольтаических преобразователей вызывает повышенный интерес. Это в первую очередь связано с необходимостью увеличения эффективности солнечных преобразователей и радионуклидных источников питания, а так же эффективного использования тепловых потерь. Задачей данной работы является создание уникальной системы на основе нанокластеров металлов, потенциально позволяющей эффективно поглощать и преобразовывать широкий спектр оптического излучения, включая ближний ИК-диапазон, с целью последующего создания эффективного тепло-фотовольтаического материала на основе наноструктурированной пленки.

При помощи кластерного источника Nanogen-50 (Mantis Deposition Ltd.), установленного в сверхвысоковакуумном комплексе анализа поверхности Omicron Multiprobe MXPS RM VT AFM-25, удалось методом магнетронного осаждения из газовой фазы создать наноструктурированные пленки различной толщины, состоящие из наноразмерных кластеров, отвечающих необходимым требованиям. При помощи установленного на выходе из кластерного источника масс-фильтра MesoQ (Mantis Deposition) обеспечивалась возможность формирования потока монодисперсных наночастиц с отклонением по размерам не более 2% с последующим осаждением на поверхность подложки. Были получены кластерные плёнки с диаметром нанокластеров тантала от 1,5 нм до 15 нм на кремнии. Морфология поверхности нанокластерной плёнки исследовалась при помощи сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии (рис. 1).

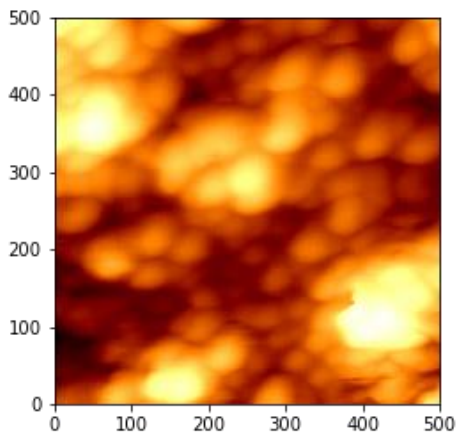


Рис. 1. Изображение топографии поверхности образца кремния с нанокластерами тантала, полученное при помощи атомно-силовой микроскопии (размер области сканирования 500нм X 500нм)

**Секция
СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Руководитель секции

- зам.зав. кафедры 70
Менушенков Алексей Павлович

Секретари секции

- ассистент кафедры 70
Чернышева Ольга Викторовна

Тел.: 8(495)788-56-99, доб.8194
E-mail: ovchernysheva@mephi.ru

Д.А. БУЧНЫЙ^{1,2}, В.С. ЛИТВИН², Д.Н. ТРУНОВ², В.Н. МАРЬИН², С.Н. АКСЕНОВ², Р.А. САДЬКОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СЧЕТЧИКА НЕЙТРОНОВ НА БАЗЕ ZNS(AG)/LiF

Методами Монте-Карло проведено моделирование линейного нейтронного сцинтилляционного счетчика и эксперимента по порошковой дифракции с его участием. Осуществлен анализ эффективности регистрации нейтронов при варьировании ориентации слоев сцинтиллятора относительно подаваемого на образец нейтронного пучка на различных углах рассеяния.

D.A. BUCHNYY^{1,2}, V.S. LITVIN², D.N. TRUNOV², V.N. MARIN², S.N. AXENOV²,
R.A. SADYKOV²

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

²Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

EFFICIENCY SIMULATION OF A ZnS(Ag)/LiF BASED NEUTRON SCINTILLATION COUNTER

Monte Carlo simulations of neutron scintillation counter and powder diffraction experiment utilizing it were conducted. Neutron detection efficiency analysis was performed varying the orientation of the scintillator layers with respect to the neutron beam at different scattering angles.

В ИЯИ РАН разработаны кольцевые сцинтилляционные детекторы нейтронов, составленные из линейных счетчиков на основе ZnS(Ag)/LiF и твердотельных фотоумножителей [1,2]. Сочетание компактности и эффективности данных приборов позволяет создавать из них блоки детекторов, регистрирующие одновременно множество дифрактограмм в широком диапазоне переданных импульсов при порошковой времяпролетной дифракции нейтронов.

В настоящей работе был проведен численный анализ эффективности и оценка разрешающей способности различных конфигураций линейного нейтронного счетчика. Целью анализа является оптимизация его конструкции в зависимости от положения относительно образца и подаваемого на него нейтронного пучка в условиях сохранения технической простоты. Осуществлено два этапа моделирования на основе методов Монте-Карло, воспроизводящих как процесс прохождения сцинтилляционного счетчика потоком нейтронов, так и полноценный нейтронографический эксперимент. На рисунке 1 приведена полученная в ходе симуляции эффективность линейных сцинтилляционных счетчиков в зависимости от ориентации слоев сцинтиллятора.

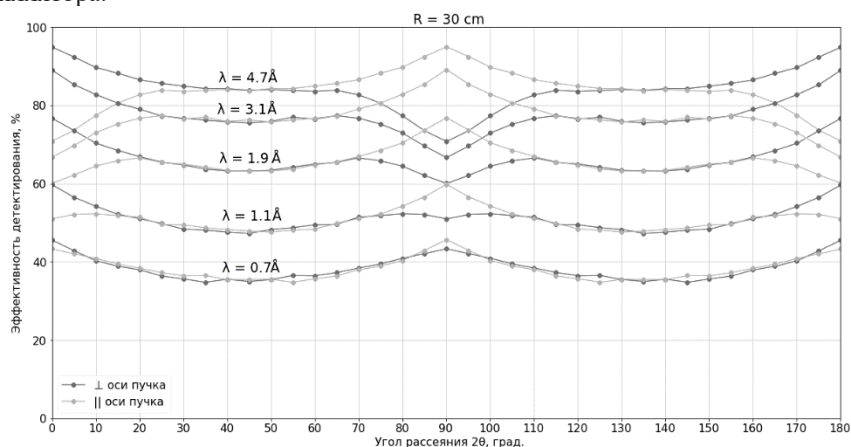


Рис. 1. Эффективность регистрации нейтронов на углах рассеяния от 0° до 180° (R - расстояние образец-детектор, λ - длина волны нейтрона).

Список литературы

1. Litvin V.S., Marin V.N., Karaevsky S.K. et al // Crystallography Reports. 2016. V. 61. P. 106.
2. Marin V.N., Sadykov R.A., Trunov D.N. et al // Instruments and Experimental Techniques. 2018. V. 61. P. 1.

А.В. ГОРЯЧЕВСКИЙ^{1,2}, Л.П. СУХАНОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛИЖАЙШЕГО ОКРУЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОГО ЦЕНТРА В МОЛЕКУЛЕ ГЕМОГЛОБИНА С ПОМОЩЬЮ XANES-СПЕКТРОСКОПИИ

Разработана расчётная методика для интерпретации XANES спектров молекулы гемоглобина. В дальнейшем результаты расчетов будут использованы для уточнения степени окисления и координационного числа Fe-центра гемоглобина по данным XANES спектров, а также расположения лигандов. Данное исследование полезно для развития аппаратно-методической базы XANES-спектроскопии.

A.V. GORYACHEVSKIY^{1,2}, L.P. SUKHANOV^{1,2}

¹National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

MODELING OF THE COORDINATION SPHERE OF THE IRON CENTER IN A HEMOGLOBIN MOLECULE USING XANES SPECTROSCOPY

A computational technique has been developed for the interpretation of the XANES spectra of the hemoglobin molecule. In the future, the results of calculations will be used to clarify the oxidation state and the coordination number of the Fe center of hemoglobin according to XANES spectra, as well as the location of ligands. This study is useful for the development of the hardware and methodological base of XANES spectroscopy.

Выполненные в НИЦ «Курчатовский институт» экспериментальные исследования протеиновых плёнок (в частности, гемоглобина) [1, 2] на поверхности жидкости делают актуальными вопросы интерпретации XANES (X-ray absorption near-edge structure) [3] спектров для моделирования процессов, происходящих в ближней координационной сфере Fe-центра гемоглобина.

Для разработки оптимальной расчётной методики между точностью рассчитываемых характеристик и затратами компьютерных ресурсов методом теории функционала плотности B3LYP [4-7] выполнен кластерный расчет D_{4h}-симметричного Fe-порфиринового комплекса с оптимизацией геометрии. При этом использовались разные наборы базисных функций Попла [8]: 6-31G, 6-31G*, 6-31G**, 6-31+G** и 6-31++G**. Равновесные значения декартовых координат атомов комплекса оказались в пределах 0,02 Å устойчивыми к расширению базисного набора. Рассчитанные расстояния Fe-N согласуются с измеренными [9] в пределах экспериментальных погрешностей. Заряд по Малликену на атоме железа также практически не зависит от базисного набора, поэтому есть основания считать расчётную методику устойчивой и применить ее к моделированию геометрического строения и электронной структуры ближней координационной сферы Fe-центра гемоглобина.

Методом B3LYP/6-31G** выполнен квантово-химический расчет молекулы гема - активного комплекса в молекуле гемоглобина человека, отвечающего за транспорт кислорода и углекислого газа в организме. Получена энергия связи 6,97 кэВ остовных электронов Fe1s, которая с точностью 2% совпадает с положением края XANES спектра поглощения гемоглобина. Расчеты молекулы гема проводились в синглетном состоянии и при фиксированной геометрии как для нейтрального, так и заряженных кластеров (заряд +2 и +4). Для нейтрального кластера построена высшая занятая молекулярная орбиталь (ВЗМО). Анализ формы ВЗМО молекулы гема, рассчитанной по теории функционала плотности при пороговом значении плотности вероятности 0,02, показал, что заселенность валентных орбиталей определяется не только заселенностью орбиталей на атоме железа, но и преимущественно заселенностью на порфириновом комплексе. Анализ заселенностей по Малликену [10] атома железа показывает, что при зарядке кластера заряд Fe-центра меняется незначительно (в пределах 0,2 заряда электрона), и можно говорить о сохранении степени окисления атома железа при зарядке молекулы. Сделан вывод о том, что на степень окисления координационного центра влияют наличие внешних лигандов, их тип и расположение.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90246.

Список литературы

1. Novikova N.N. et al. // J. Phys. Chem. B. 2019. V. 123. P. 8370.
2. Novikova N.N. et al. // Crystallography Reports. 2019. V. 64, № 6. P. 952.
3. Joly Y. // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 2001. V. 63. P. 125120.
4. Kohn W., Sham L.J. // Phys. Rev. A. 1965. V. 140. № 4. P. A1133.
5. Becke A.D. // Phys. Rev. A. 1988. V. 38. № 6. P. 3098.
6. Becke A.D. // J. Chem. Phys. 1993. Vol. 98. № 2. P. 1372.
7. Lee C., Yang W., Parr R.G. // Phys. Rev. B. 1988. V. 37. № 2. P. 785.
8. Frisch M.J. et al. Gaussian 09, Revision A.02. // Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2009.
9. Lima F.A. et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. V. 16. P. 1617.
10. Фудзинага С. // Метод молекулярных орбиталей. Пер. с японск. – М.: Мир, 1983. – 461 с.

РАДИОГРАФИЯ НЕЙТРОННЫМИ ПОТОКАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ ПРОТОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ

Рассмотрен новый метод визуализации с высоким пространственным разрешением низкоплотных объектов за высокоплотными преградами: импульсная радиография высокопоточными нейтронными потоками, генерируемыми в мишенях-конвертерах из вольфрама при их облучении протонными пучками высоких энергий. Получены радиографические изображения боро- и углеродосодержащих объектов, в том числе животного происхождения с разрешающей способностью ~ 200 мкм, находящихся за свинцовой преградой толщиной 40 см.

BAZAROV YU.B., KARPOV M.A., MARMYSHEV V.V., BELOV S.V., DEMIDOV A.A., KHRISTENKO A.A.
FSUE RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

RADIOGRAPHY BY NEUTRON BEAMS GENERATED FROM HIGH ENERGY PROTON SPALLATION REACTIONS IN TUNGSTEN TARGET

A new method of visualization with high spatial resolution of various small-sized low-density objects against the background of thick high-density obstacles is considered: pulsed neutron radiography by high-flux neutron beams generated in heavy converter targets when they are irradiated with high-energy proton beams. Neutron radiographic images of boron- and carbon-containing objects, including of animal origin, with a resolution of ~ 200 μm , located behind a 40-cm-thick lead barrier, were obtained.

В настоящее время для исследования внутренней структуры различных объектов, а также в области неразрушающего контроля широко используется метод рентгеновской и гамма радиографии [1], также в последние годы развивается метод протонной [2] и синхротронной [3] радиографии. Эти методы используют для получения изображений высокоэнергетические протоны, или гамма-кванты. Вероятность поглощения гамма-кванта веществом зависит от его энергии и плотности вещества, а для настройки глубины Брэгговского пика энергией протонного пучка требуется иметь априорную информацию о плотности и составе исследуемой композиции, что не всегда возможно. Наличие дополнительного фона от Комптоновского рассеяния в материале и вторичное излучение при этом вносит дополнительный паразитный фон в изображение, ухудшая разрешающую способность и отношение сигнал-шум. Для задач распознавания объектов, состоящих из легких элементов, в том числе органического происхождения, большими перспективами обладает нейтронная радиография [4], позволяющая визуализировать малоплотные объекты, расположенные за высокоплотными преградами. Проведенные нами эксперименты по разработке импульсного нейтронного источника на основе вольфрамовой мишени, облучаемой высокоэнергетическими протонами, позволили получить высококачественные нейтронные изображения объектов, расположенных за свинцовой преградой толщиной 40 см между объектами и источником нейтронов (рисунок 1).

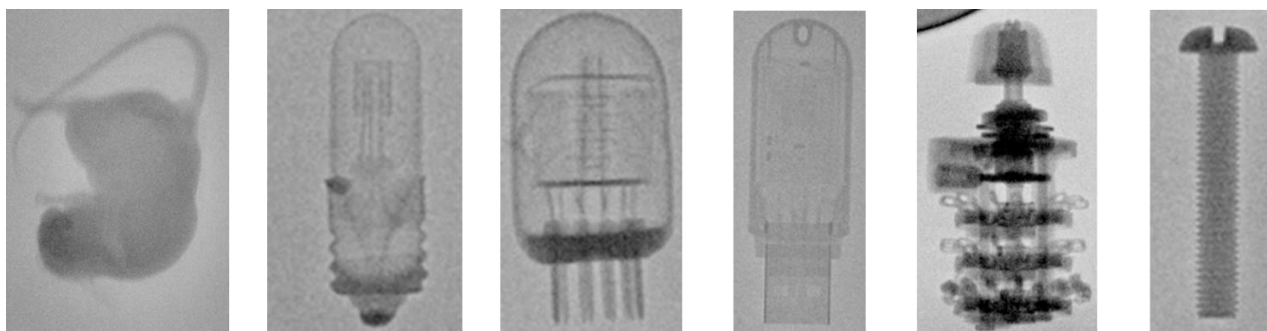


Рисунок 1. Изображения некоторых объектов в нейтронном пучке: лабораторная мышь (*Mus albus officinarum*), галогеновая лампа, вакуумная радиолампа, флеш-диск, реле, латунный винт.

Список литературы

2. Alexander Rack, Margie Olbinado, Mario Scheel et al // Real-Time Hard X-ray Imaging. Springer Link Publishing AG, 2018.
3. Бурцев В.В., Лебедев А.И., Михайлов А.Л. и др. Многокадровая протонография на базе ускорителя У-70 как метод исследования быстропротекающих гидродинамических процессов. // В сб.: 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011. Вып. 2. С. 205.
4. К.А. Тен, Э.Р. Прууэл, А.О. Кашкаров и др. Регистрация выброса частиц из ударно-нагруженных металлов методами синхротронного излучения // ФГВ. 2018. №5. С.103.
5. Neutron Imaging: a non-destructive tool for materials testing. IAEA-TecDoc-1604 (2008).

О.В.КАШУРНИКОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

АНАЛИЗ КАТИОННОЙ СТРУКТУРЫ НАНОПОРОШКОВ $Dy_2Hf_2O_7$ С ПОМОЩЬЮ СТРУКТУРЫ ВЕБЕРИТА (НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ EXAFS-СПЕКТРОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО)

Методом обратного Монте-Карло были проанализированы EXAFS-спектры нанопорошков $Dy_2Hf_2O_7$, полученные при температурах отжига 800-1600°C, с предполагаемой структурой дефектного флюорита во всем диапазоне. Для учета смещения катионов в локальной структуре из симметричных позиций и корректного моделирования второго пика Фурье EXAFS-спектров была использована начальная структура веберита, в которой данные смещения легко параметризовать, что позволило получить начальную структуру, достаточно близкую к искомой, и повысить эффективность моделирования.

O.V. KASHURNIKOVA

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

$Dy_2Hf_2O_7$ NANOPOWDERS CATIONIC STRUCTURE ANALYSIS ON BASE OF WEBERITE STRUCTURE (REVERSE MONTE-CARLO EXAFS-SPECTRA SIMULATION)

The EXAFS spectra of $Dy_2Hf_2O_7$ nanopowders were simulated by means of reverse Monte-Carlo method. Nanopowders synthesized at annealing temperatures 800-1600°C were supposed to be of defect fluorite structure within the range. For the correct simulation of second EXAFS Fourier peak and consideration of cations moved from symmetric positions the weberite base structure was used. This structure allowed to parametrize cation moves, get a base structure close enough to a structure in question and to increase the simulation efficiency.

Моделирование соединений, демонстрирующих некоторую степень структурного беспорядка, таких, как флюориты, с одной стороны, имеет прикладную ценность, так как данные соединения демонстрируют ряд полезных свойств именно в связи со структурой [1]. С другой стороны, моделирование EXAFS-спектров, чувствительных к усредненному локальному окружению данного химического элемента, затруднено сложностью структуры. В отличие от чисто кристаллических соединений, кроме термального беспорядка, добавляется структурный беспорядок в виде смещений атомов в зависимости от их локального окружения. Смещения могут достигать 0.1-0.2 Å, как показали предыдущие исследования EXAFS-спектров гафната диспрозия [1], а число возможных различных окружений данного атома хоть и конечно, но достаточно велико, чтобы модель оказывалась слишком сложной для анализа с помощью обычного моделирования методом наименьших квадратов. С другой стороны, наши предыдущие исследования [2,3] с помощью программы EvAX [4] показали, что такие смещения начальной структуры достаточно критичны и для метода Монте-Карло, т.к. сильно увеличивают фазовое пространство. Однако, Монте-Карло как раз и позволяет учесть различные смещения атомов в модели «реальной» структуры в статистическом виде, но, как и любые методы минимизации, требует предположений о начальной структуре.

Проблема может быть решена при выборе начальной структуры, которая изначально включает достаточный процент катионов, смещенных из симметричных положений. Смещения кислорода достаточно легко внести в начальную структуру вручную программным образом, используя всего 5 возможных тетраэдрических окружений, на основе симметрии таковых в известной структуре пирохлора, произведя начальный подбор параметров вручную. К сожалению, в структурах пирохлора и флюорита катионы находятся в строго симметричных позициях; как показали предыдущие исследования [2,3], в подобных «легированных» системах смещения катионов под влиянием соседей учитывать нужно уже в начальной структуре, иначе невозможно добиться корректного моделирования второго пика Фурье, отвечающего за расстояния между соседними катионами. В данной работе начальная структура выбрана в форме веберита, в которой присутствует достаточный процент катионов (а значит, и соответствующих кластеров), смещенных из положений равновесия, также параметры орторомбической ячейки изменяются, определяя смещение остальных позиций по сравнению со структурой идеального флюорита. Как показали исследования с помощью метода парных функций распределения на основе данных дифракции [5], данная структура хорошо подходит для моделирования ближнего порядка в соединениях данного класса, тогда как дальний порядок ближе к структуре флюорита.

В данной работе для реализации более точного моделирования и поиска подходящих структурных моделей использованы спектры, исследованные ранее с участием автора обычным методом наименьших квадратов в работе [1].

Список литературы

1. В.В. Попов и др. // Журнал неорганической химии 2011. Т.56, №10. С. 1617.
2. О.В.Кашурникова // Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛАПЛАЗ-2020, 2020. С. 212.
3. О.В.Кашурникова // Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛАПЛАЗ-2021, 2021. С. 229.
4. J. Timoshenko, A. Kuzmin, J. Purans // J. Phys.: Condens. Matter 2004. V.26. P. 055401.
5. J.Shamblin et al. // Nature Materials 2016. V.15. P. 507.

П.В. КОНАРЕВ^{1,2}, В.В. ВОЛКОВ¹

¹ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

²НИИ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

РАЗВИТИЕ КРОСПЛАТФОРМЕННЫХ ПРОГРАММ С ГРАФИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ

Создана новая кроссплатформенная программа PeakQt для анализа данных малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) от частично упорядоченных систем. Разработан графический интерфейс программы Efamix, восстанавливающей профили рассеяния отдельных компонентов в белковых смесях по данным МУРР с использованием хроматографической колонки онлайн.

P.V. KONAREV^{1,2}, V.V. VOLKOV¹

¹FSRC “Crystallography and photonics”, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF CROSS-PLATFORM PROGRAMS WITH GRAPHICAL USER INTERFACE FOR THE ANALYSIS OF SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING DATA

The new cross-platform graphical program PeakQt was developed to analyze small-angle X-ray scattering (SAXS) data from partially ordered systems. A graphical user interface for the program Efamix was implemented for restoring the scattering profiles of individual components in protein mixtures using size exclusion chromatography (SEC)-SAXS data.

Метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) является эффективным структурным методом анализа растворов белков, полимеров и частично упорядоченных систем в наноразмерном диапазоне. Одним из важных преимуществ метода МУРР является возможность изучения структуры биологических макромолекул в растворе в их естественных физиологических условиях и исследования реакции системы на изменения условий среды, таких как температура, pH, концентрация белка, состав буферного раствора.

В случае частично упорядоченных систем кривые малоуглового рассеяния содержат уширенные дифракционные пики, по которым можно определить такие структурные параметры, как межплоскостное расстояние и средний размер кристаллитов. Ранее нами была разработана графическая программа Peak [1], однако она использует библиотеку QuickWin для Windows-платформы, что в определенной мере ограничивало ее использование. Нами была создана новая кроссплатформенная версия программы PeakQt, которая использует графическую библиотеку Qt. Она позволяет в интерактивном режиме выбирать нужный интервал для анализа структурных характеристик пика, расчет которых проводится с помощью минимизационного пакета MINPACK (<https://www.math.utah.edu/software/minpack.html>).

Алгоритмы восстановления трехмерной формы частиц в моносферных растворах по данным МУРР работают весьма эффективно, однако в ряде случаев экспериментальная кривая содержит вклады от нескольких типов частиц (компонент), что существенно усложняет их анализ. Особый интерес представляет задача нахождения профилей рассеяния компонент и соответствующих концентраций по малоугловым данным от растворов белковых смесей, полученных при использовании хроматографической колонки on-line (SEC-SAXS). Ранее нами была создана программа Efamix [2] использует методы сингулярного разложения и эволюционирующего факторного анализа и работает в автоматическом режиме. Однако в ряде случаев поиск концентрационных диапазонов присутствия компонент требуется проводить в ручном режиме. Поэтому был разработан кроссплатформенный графический интерфейс для вызова Efamix, который интегрирован в программу Chromixs [3] и позволяет проводить обработку данных в интерактивном режиме. Новая опция существенно улучшила эффективность обработки данных SEC-SAXS и восстановления профилей отдельных компонент в белковых смесях.

Программы PeakQt и Efamix входят в пакет ATSAS [4] (релиз 3.1.0) и доступны на сайте <https://www.embl-hamburg.de/biosaxs/software.html>.

Исследование финансировалось Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы (соглашение No. 075-15-2021-1355 от 12 октября 2021 года).

Список литературы

1. Konarev P.V., Volkov V.V., Sokolova A.V., *et al.* // J. Appl. Cryst. 2003. V. 36, P. 1277.
2. Konarev P.V., Graewert M.A., Jeffries C.Y., *et al.* // Protein Science 2022. V. 31, P. 269.
3. Panjkovich A., Svergun D.I. // Bioinformatics 2018. V. 34. P. 1944.
4. Malonastas-Castos K., Konarev P.V., Hajizadeh N.R., *et al.* // J. Appl. Cryst. 2021. V. 54, P. 343.

Р.М. МЕНШАРАПОВ¹, Н.А. ИВАНОВА¹, Д.Д. СПАСОВ^{1,2}, А.А. ЗАСЫПКИНА¹, Е.А. СЕРЕГИНА¹, В.Н. ФАТЕЕВ¹.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕМБРАН NAFION® МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ

Получены кривые малоуглового рентгеновского рассеяния для образцов мембраны Nafion® подверженных циклам заморозки-оттаивания в присутствии гидрофильных модификаторов или раствора метанола. Показано влияние внешних условий на структурные свойства мембран Nafion®.

R.M. MENSCHARAPOV¹, N.A. IVANOVA¹, D.D. SPASOV^{1,2}, A.A. ZASYPKINA¹, E.A. SEREGINA¹, V.N. FATEEV¹.

¹ National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE NAFION® MEMBRANES BY SMALL ANGLE X-RAY SCATTERING

Small-angle X-ray scattering curves are obtained for Nafion® membrane samples after freeze-thaw cycles in the presence of hydrophilic modifiers or methanol solution. The influence of the environmental conditions on the Nafion® membrane structure is shown.

Мембраны марки Nafion® (DuPont, США) широко используются в качестве твердого полимерного электролита в водородных топливных элементах благодаря высокой протонной проводимости, высокой механической прочности и низкой газовой проницаемости. Структура мембраны включает политетрафторэтиленовый скелет, который формируют ламеллярную структуру и выступают в качестве матрицы для сульфогрупп, которые в присутствии воды формируют ионные домены, обеспечивающие транспорт протонов.

Согласно работе [1], большое количество воды в объеме пор способно приводить к кристаллизации воды, что, при проведении циклов заморозки-оттаивания (з-о), обуславливает образование дефектов в структуре. Добавление метанола в качестве антифриза [2], или гидрофильных модификаторов [3] может предотвратить образование льда.

В настоящей работе проведено исследование структуры мембран Nafion® методом малоуглового рентгеновского рассеяния и рассмотрено влияние отрицательных температур (–40°C) в ходе циклов з-о на внутреннюю структуру мембран: на стандартную мембрану в присутствии воды, в присутствии раствора метанола и на структуру мембран, чья поверхность была предварительно модифицирована диоксидом кремния.

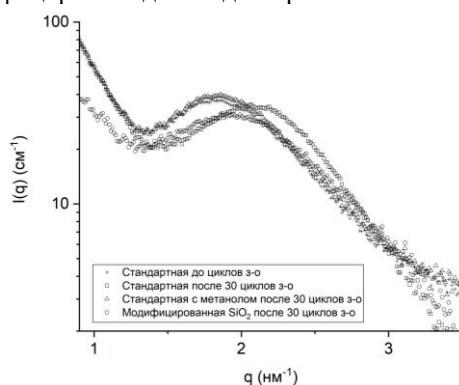


Рис. 1. Кривые малоуглового рентгеновского рассеяния для образцов мембраны Nafion® с характерным пиком, соответствующим ионным доменам.

Добавление метанола перед циклами з-о позволяет сохранить структуру мембраны без изменения, модификация диоксидом кремния приводит к уменьшению размера ионных доменов, благодаря перераспределению воды из объема мембраны в приповерхностный слой, что отражается на сдвиге пика в область больших q (рис. 1).

Благодарность. Работа выполнена при поддержке в рамках выполнения научно-исследовательских работ в НИЦ "Курчатовский институт" (приказ № 2758 от 28 октября 2021 г.) и гранта РФФИ № 18-29-23030

Список литературы

1. Nicotera I. et al. NMR investigation of the dynamics of confined water in Nafion-based electrolyte membranes at subfreezing temperatures //The Journal of Physical Chemistry B. 2009. V. 113. №. 42. P. 13935.
2. Ivanova N. A. et al. On the influence of methanol addition on the performances of PEM fuel cells operated at subzero temperatures //International Journal of Hydrogen Energy. 2021. V. 46. №. 34. P. 18116.
3. Jalani N. H., Dunn K., Datta R. Synthesis and characterization of Nafion®-MO₂ (M= Zr, Si, Ti) nanocomposite membranes for higher temperature PEM fuel cells //Electrochimica Acta. 2005. V. 51. №. 3. P. 553.

В.В. ПОПОВ^{1,2}, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, Ф.Э. ДУБЯГО¹, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ¹, С.Г. РУДАКОВ¹, Р.Д. СВТОГОРОВ², Е.В. ХРАМОВ², Н.А. КОЛЬШКИН², И.В. ЩЕТИНИН³, И.Г. БОРДЮЖИН³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ, ЛОКАЛЬНУЮ И ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ $Ce^{3+}_{(1-x)}Ce^{4+}_xCrO_{(3+x/2)}$

Кристаллическая, локальная и электронная структура $Ce^{3+}_{(1-x)}Ce^{4+}_xCrO_{(3+x/2)}$ были изучены с помощью комплекса дифракционных (s-XRD) и спектральных (XAFS) методов с использованием синхротронного излучения, синхронного термического анализа (СТА). Показано, что состав и структура хроматов церия зависят как условий синтеза прекурсоров, так и условий последующей термообработки.

V.V. POPOV^{1,2}, A.P. MENUSHENKOV¹, F.E. DUBYAGO¹, A.A. YASTREBTSEV¹, R.G. RUDAKOV¹, R.D. SVETOGOROV², E.V. KHRAMOV², N.A. KOLYSHKIN², I.V. SHCHETININ³, I.G. BORDYUZHIN³

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

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

EFFECT OF THE SYNTHESIS CONDITIONS ON THE CRYSTAL, LOCAL, AND ELECTRONIC STRUCTURE OF $Ce^{3+}_{(1-x)}Ce^{4+}_xCrO_{(3+x/2)}$

The crystal, local and electronic structure of $Ce^{3+}_{(1-x)}Ce^{4+}_xCrO_{(3+x/2)}$ were studied using a combination of s-XRD, XAFS and STA methods. It was shown that the composition and structure of Ce chromates depend both on the synthesis conditions of precursors and on the parameters of their subsequent heat treatment.

Кислородсодержащие соединения церия представляют большой интерес как с научной, так и с практической точек зрения благодаря способности катионов церия изменять степень окисления (Ce^{3+}/Ce^{4+}) в зависимости от условий получения. Материалы на основе сложных оксидов церия имеют большое практическое значение для получения катализаторов, твердооксидных топливных элементов, ингибиторов коррозии и т.д. Цель данной работы – синтез хроматов церия $Ce^{3+}_{(1-x)}Ce^{4+}_xCrO_{(3+x/2)}$ и изучение их кристаллической, локальной и электронной структуры с использованием уникальной комбинации локально-чувствительных методов рентгеновской дифракции (s-XRD) и рентгеновской спектроскопии поглощения (XAFS).

Порошки хроматов церия были синтезированы путем соосаждения водных растворов нитратов церия $Ce(NO_3)_3$ или $(NH_4)_2Ce(NO_3)_6$ растворами K_2CrO_4 или $Cr(NO_3)_3$ с последующим изотермическим отжигом прекурсоров на воздухе $620^\circ C/1$ ч или в вакууме при $1200^\circ C/3$ ч (таблица). Было установлено, что прекурсор № 1 имел состав $Ce_2(CrO_4)_3 \cdot 7H_2O$ с моноклинной структурой (пр. гр. $P2_1/c$). Остальные прекурсоры Ce хроматов были рентгеноаморфными. Отжиг на воздухе при $620^\circ C$ приводил к образованию смеси CeO_2 ($Fm-3m$) + Cr_2O_3 ($R-3c$).

Таблица. Условия синтеза, фазовый состав (s-XRD) и отношение Ce^{3+}/Ce^{4+} (XANES) для синтезированных образцов хроматов церия.

№	Реакция синтеза	Прекурсор	$620^\circ C/1$ ч (воздух)	$1200^\circ C/3$ ч (вакуум)
1	$Ce(NO_3)_3 + K_2CrO_4$	$Ce_2(CrO_4)_3 \cdot 7H_2O$ (пр. гр. $P2_1/c$) $Ce^{3+/4+} = 89\% / 11\%$	89% CeO_2 ($Fm-3m$) + 11% Cr_2O_3 ($R-3c$) $Ce^{4+} = 100\%$	85% $CeCrO_3$ ($Pnma$) + 5% CeO_2 ($Fm-3m$) + 10% Cr_2O_3 ($R-3c$) $Ce^{3+}/Ce^{4+} = 85\% / 15\%$
2	$(NH_4)_2Ce(NO_3)_6 + K_2CrO_4$	$Ce(CrO_4)_2 \cdot nH_2O$ рентгеноаморф. $Ce^{4+} = 100\%$	92% CeO_2 ($Fm-3m$) + 8% Cr_2O_3 ($R-3c$) $Ce^{4+} = 100\%$	82% $CeCrO_3$ ($Pnma$) + 15% CeO_2 ($Fm-3m$) + 3% Cr_2O_3 ($R-3c$) $Ce^{3+}/Ce^{4+} = 70\% / 30\%$
3	$Ce(NO_3)_3 + Cr(NO_3)_3$	$CeCr(OH)_6 \cdot nH_2O$ рентгеноаморф. $Ce^{4+} = 100\%$	93% CeO_2 ($Fm-3m$) + 7% Cr_2O_3 ($R-3c$) $Ce^{4+} = 100\%$	97% $CeCrO_3$ ($Pnma$) + 2% CeO_2 ($Fm-3m$) + 1% Cr_2O_3 ($R-3c$) $Ce^{3+}/Ce^{4+} = 91\% / 9\%$
4	$(NH_4)_2Ce(NO_3)_6 + Cr(NO_3)_3$	$CeCr(OH)_7 \cdot nH_2O$ рентгеноаморф. $Ce^{4+} = 100\%$	93% CeO_2 ($Fm-3m$) + 7% Cr_2O_3 ($R-3c$) $Ce^{4+} = 100\%$	95% $CeCrO_3$ ($Pnma$) + 5% CeO_2 ($Fm-3m$) $Ce^{3+}/Ce^{4+} = 92\% / 8\%$

Отжиг в вакууме позволил синтезировать $Ce^{3+}_{(1-x)}Ce^{4+}_xCrO_{(3+x/2)}$ с незначительным содержанием катионов Ce^{4+} ($x \sim 0.08-0.09$) (таблица). Сделан вывод об обратимости реакции $4CeCrO_3 + O_2 \leftrightarrow 4CeO_2 + 2Cr_2O_3$.

Работа была частично поддержана Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352).

В.В. ПОПОВ^{1,2}, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, Ф.Э. ДУБЯГО¹, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ¹, Б.Р. ГАЙНАНОВ¹, С.Г. РУДАКОВ¹, Р.Д. СВЕТОГОРОВ², Н.А. КОЛЫШКИН², Е.В. ХРАМОВ², Н.В. ОГНЕВСКАЯ³,
Н.А. ЦАРЕНКО³, О.Н. СЕРЕГИНА³, И.В. ЩЕТИНИН⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³АО ВНИИПромтехнологии, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ, ЛОКАЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ХРОМАТОВ $LnCrO_4$

Однофазные хроматы(V) PЗЭ $LnCrO_4$ ($Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$) получены мягкой термообработкой прекурсоров $Ln-Cr(III)$ и $Ln-Cr(VI)$, синтезированных методом соосаждения. Установлена взаимосвязь кристаллической, локальной и электронной структуры полученных образцов с условиями синтеза.

V.V. POPOV^{1,2}, A.P. MENUSHENKOV¹, F.E. DUBYAGO¹, A.A. YASTREBTSEV¹, B.R. GAYNANOV¹, R.G. RUDAKOV¹, R.D. SVETOGOROV², N.A. KOLYSHKIN², E.V. KHRAMOV², N.V. OGNEVSKAYA³, N.A. TSARENKO³, O.N. SEREGINA³, I.V. SHCHETININ⁴

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

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

⁴National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF THE CRYSTAL, LOCAL AND ELECTRONIC STRUCTURE OF $LnCrO_4$ CHROMATES

Single-phase rare-earth element chromates(V) $LnCrO_4$ ($Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$) were prepared by mild heat treatment of $Ln-Cr(III)$ and $Ln-Cr(VI)$ precursors synthesized by the coprecipitation method. The relationship between the crystal, local and electronic structure of the obtained samples and the synthesis conditions has been established.

Хроматы(V) PЗЭ являются частью большого семейства сложных оксидов типа ABO_4 (где А - редкоземельный элемент, а В = Р, As, Cr и V), которые обладают интересными структурными и магнитными свойствами. Эти соединения благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам (в основном из-за большого количества наблюдаемых основных состояний и свойств, таких как мультиферроичность, колоссальное магнитосопротивление и др.) являются перспективными для использования их в различных технологических приложениях [1].

Цель данной работы – изучение влияния условий синтеза на кристаллическую, локальную и электронную структуру хроматов(V) PЗЭ $LnCrO_4$ с использованием уникальной комбинации локально-чувствительных методов рентгеновской дифракции (s-XRD) и рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES и EXAFS), а также ИК- и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), синхронного термического анализа (ДСК + ТГ), АЭС-ИСП.

Порошки $LnCrO_4$ были получены мягкой термообработкой (450-550°C) прекурсоров $Ln-Cr(III)$ и $Ln-Cr(VI)$, синтезированных методом соосаждения водных растворов нитратов PЗЭ $Ln(NO_3)_3$ и $Cr(NO_3)_3$ [1] или K_2CrO_4 [2], соответственно. Все синтезированные прекурсоры $Ln-Cr(III)$ ($Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$) и $Ln-Cr(VI)$ ($Ln = Gd, Dy, Ho, Yb, Y$) имели атомное отношение $Ln : Cr \approx 1 : 1$ и являлись рентгеноаморфными. Прекурсоры $Ln-Cr(III)$ были гидратированными основными карбонатами с примерной формулой $(Ln/Cr)OH(CO_3) \cdot nH_2O$. Было установлено, что дальнейшая термообработка приводила в случае $LaCrO_4$ к образованию моноклинной структуры (пр. гр. $P2_1/n$), или смеси моноклинной или тетрагональной фаз для $PrCrO_4$ (99% / 1%) и $NdCrO_4$ (1% / 99%). Дальнейшее уменьшение радиуса PЗЭ приводило к образованию однофазных порошков $LnCrO_4$ ($Ln = Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$), имеющих тетрагональную структуру (пр. гр. $I4_1/amd$). Анализ XANES-спектров на К-Сг крае показал изменение степени окисления катионов хрома при термообработке как прекурсоров $Ln-Cr(III)$ (с +3 до +5), так и $Ln-Cr(VI)$ (с +6 до +5). Уменьшение полуширины белой линии XANES-спектров на L_3-Ln крае с уменьшением радиуса катионов PЗЭ указывает на изменение локальной структуры в результате $p-d$ гибридизации и возможное увеличение координационного числа [3]. В ряду $LnCrO_4$ (пр. гр. $I4_1/amd$) при переходе от Sm к Yb обнаружен эффект смещения положения полос поглощения валентных колебаний тетраэдров CrO_4^{3-} в ИК-спектрах (мод в спектрах КР) в сторону больших волновых чисел, что коррелирует с уменьшением длин связей $d(Cr-O)$ и $d(Ln-O)$.

Работа выполнена в рамках Госзадания на НИР (проект FSWU-2020-0035) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Fabian F.A., Barbosa C.C.S., Santos J.G. et al. // J. Alloys Compd. 2020. V. 815. P. 152427.
2. Popov V.V., Menushenkov A.P., Yastrebtev A.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2036. P. 012022.
3. Asakura H., Hosokawa S., Teramura K. et al. // Inorg. Chem. 2021 V. 60. P. 9359.

А.А. СЕРЕГИН, О.В. ЧЕРНЫШЕВА, А.В. ШЕЛЯКОВ, Н.Н. СИТНИКОВ, К.А. БОРАДАКО
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СПЛАВОВ TiNiCu С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МАРТЕНСИТНОЙ И АУСТЕНИТНОЙ ФАЗАХ

Проведено исследование влияния метода закалки сплава $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$ на его локальную структуру. Были выявлены различия в локальной структуре аустенитной фазы, в то время как в мартенситной фазе различий не обнаружено.

A.A. SEREGIN, O.V. CHERNYSHEVA, A.V. SHELYAKOV, N.N. SITNIKOV, K.A. BORODAKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

LOCAL STRUCTURE OF TiNiCu SHAPE MEMORY ALLOYS IN AUSTENITIC AND MARTENSITIC PHASES

The effect of thermal treatment method of $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$ alloy on its local structure was researched. Several differences in local structure were found in austenitic phase, while no difference in martensitic phase was revealed.

Сплавы на основе TiNi – наиболее распространённые материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ). Структура сплавов, их свойства и наличие ЭПФ во многом зависят от содержания Cu и Ni [1-2]. Свойства мартенситного превращения, несомненно, связаны с перемещениями атомов при охлаждении и нагреве сплавов. При этом эффекты, сопровождающие мартенситный переход при охлаждении и нагреве сплавов, практически не изучены на локальном уровне. В настоящей работе исследованы особенности локального окружения Ni и Cu в трёхкомпонентном сплаве $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$ с ЭПФ методом EXAFS-спектроскопии с использованием синхротронного излучения. Исследуемые образцы сплава $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$ были получены методами спиннингования расплава и планарного литья при скорости охлаждения расплава около 10^6 К/с в исходном аморфном состоянии в виде тонких лент толщиной 30-50 мкм. Затем образцы были кристаллизованы путем изотермического отжига на воздухе при 500 °С в течение 4 мин (ИК) и электроимпульсным методом с длительностью 10 мс (ЭК).

В результате обработки спектров получены параметры трех ближайших координационных сфер Cu и Ni. Форма экспериментальной EXAFS функции $\chi(k)k^2$ немного отличается для двух типов термообработки и содержания Cu. Сравнение модулей фурье-преобразования (ФТ) EXAFS-функций на краях поглощения K-Ni и K-Cu показало, что амплитуда K-Ni ФТ заметно меньше, что свидетельствует о более высокой степени разупорядочения атомов в ближайших координационных сферах никеля по отношению к окружению меди. Сравнение ФТ EXAFS-функций на крае K-Ni для аустенитной и мартенситной фазы показывает, что амплитуда первого максимума для образца ИК меньше, что указывает на более высокую степень разупорядочения атомов (величину фактора Дебая-Валлера) в локальной структуре вокруг атомов никеля. Такое же отличие спектров наблюдается и на K-Cu крае.

Результаты подгонки спектров EXAFS показали, что, как и в сплаве $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ [3], локальная структура вокруг атомов Ni и Cu в сплавах $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$ отличается. Согласно результатам, локальная структура Ni более разупорядочена и деформирована по сравнению с локальным окружением Cu, которое ближе к структуре обычного мартенсита. Такие же отличия координационных радиусов наблюдаются и в аустенитной фазе.

В мартенситном состоянии параметры локальной структуры образцов практически одинаковы. Однако, для образца ЭК в аустенитном состоянии факторы Дебая-Валлера оказались меньше, чем для ИК. То есть, локальная структура вокруг атомов никеля и меди более упорядочена для образца ЭК. Таким образом, после электроимпульсной кристаллизации сплав имеет более упорядоченную локальную структуру, нежели после изотермической.

Список литературы

1. N.N. Sitnikova, A.V. Shelyakovb, I.A. Khabibullinaa, N.A. Mitinaa, N.N. Resnina // General Purpose Materials 2018. P. 279.
2. O.V. Chernysheva, A.V. Shelyakov, N.N. Sitnikov, A.A. Veligzhanin, K.A. Borodako, R.V. Sundeev // Mater. Lett. 2020. P. 285.
3. A. Menushenkov, O. Grishina, A. Shelyakov et. al. // Journal of Alloys and Compounds 2014, vol. 585. P. 428.

У.Б. ШАРОПОВ^{1,2}

¹НИИ Физики Полупроводников и Микроэлектроники НУУз, Ташкент, Узбекистан

²Физика технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан

ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОЧИЩЕННОГО КРЕМНИЯ

Методом электронной спектроскопии рассмотрены сравнительные измерения спектров на монокристаллической и поликристаллической поверхности кремния, то есть на той же поверхности, но с нарушенной геометрической структурой (например, при адсорбции газов). Показано что, образцы с нарушенной поверхностью не дают дифракционной картины, и, следовательно, дифракционная компонента в спектре будет отсутствовать.

U.B. SHAROPOV^{1,2}

¹Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at NUUZ, Tashkent, Uzbekistan

²Physical-Technical Institute, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

ELECTRON SPECTROSCOPY OF THE PURIFIED SILICON SURFACE

Comparative measurements of spectra on a single-crystal and polycrystalline silicon surface, that is, on the same surface, but with a broken geometric structure (for example, during the adsorption of gases), are considered by the method of electron spectroscopy. It is shown that samples with a damaged surface do not give a diffraction pattern, and, consequently, the diffraction component in the spectrum will be absent.

Степень очистки оказывает непосредственное влияние на качество продукции, поэтому все больше микроэлектронных компаний прилагают усилия в этом направлении [1]. Особую важность проблема чистоты поверхности приобрела с возникновением планарной технологии [2], при которой свойства поверхности оказывают существенное влияние на параметры приборов. Знание механизма адсорбции и десорбции примесей на поверхности полупроводниковых материалов важно для проведения целенаправленного эффективного процесса очистки [3]. В производстве кремниевых интегральных схем, кроме качества структуры поверхности, большое значение имеет выбор кристаллографической ориентации кристаллов-подложек, например, плоскости (111) окисляются быстрее, чем плоскости (100), вследствие большой поверхностной плотности упаковки атомов [4], способных вступать в реакцию окисления.

Данная работа посвящена исследованию окисления поверхности кремния в вакууме методом спектроскопии полного тока с последующим отжигом. Подробное описание методики спектрометрии полного тока имеется в [5-6]. Спектры полного тока кристаллов кремния получены при облучении электронами с энергией $0 \div 100$ эВ, ток $\sim 10^{-8}$ А (ток ионов Cs^+ и $\text{Cl}^- \sim 10^{-6}$ А, энергия 3 кэВ). Чистоту поверхности контролировали по спектрам ВИМС. В качестве образцов использовали пластинки монокристаллов кремния р-типа (КДБ-7.5) с ориентацией грани (111). Рабочий вакуум при проведении исследований составлял 10^{-9} Торр.

Проведены сравнительных измерений спектров полного тока на монокристаллической поверхности кремния и на той же поверхности, но с нарушенной геометрической структурой (например, при адсорбции газов), или на моно- и поликристаллическом образцах. Образцы с нарушенной поверхностью не дают дифракционной картины, и, следовательно, дифракционная компонента в спектре будет отсутствовать. Также это относится к измерениям температурной зависимости спектров полного тока. Известно, что интенсивность дифракционных пучков уменьшается с ростом температуры образца. Поскольку волнообразная особенность связана с многократным рассеянием дифракционного пучка на поверхностном потенциальном барьере, то уменьшение ее интенсивности с ростом температуры должно приводить к уменьшению интенсивности дифракционной особенности в спектре полного тока. Используя один из рассмотренных критериев, можно уверенно выделить из спектра полного тока особенности дифракционной природы. Перспективность дифракционных эффектов в спектрах полного тока дает возможность получать не только качественную, но и количественную информацию о структуре поверхности и динамике поверхностных частиц.

Таким образом, в использовании температурного отжига для очистки поверхности кремния от загрязнений, есть свои плюсы и минусы. Нельзя допустить длительный отжиг при высоких температурах, который приводит к окислению кремния. А использование кратковременной вспышки можно использовать только для удаления физически (не химически) адсорбированного слоя атомов.

Список литературы

1. L. Zong, B. Zhu, Z. Lu, Y. Tan // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2015. V.112. P. 13473.
2. C. Papadopoulos. // Silicon Planar Processing and Photolithography. In: Nanofabrication. SpringerBriefs in Materials. Springer, Cham. 2016: P. 7.
3. S.R. Morrison // Springer US, Boston, MA, 1990: P. 251.
4. M.K. Karimov, U.O. Kutliev // E-Journal Surf. Sci. Nanotechnol. 2020, V.18. P.164.
5. U.B. Sharopov, K. Kaur // Thin Solid Films. 2021. V.735. 138902.
6. U.B. Sharopov, B.G. // J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2020. V.14, P. 101.

Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ, М.И. ЭЛБОЕВА

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

ФОТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ МОЛИБДАТА КАЛЬЦИЯ

Методом Диксона в режиме Брэгговской дифракции света на акустических волнах определена зависимость фотоупругих свойств кристаллов молибдата кальция, от направления поляризации дифрагированного света. Выявлены геометрии дифракции света, допускающие максимальное и минимальное значения акустооптической добротности.

F.R. AKHMEDZHANOV, M.I. ELBOYEVA

Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

PHOTOELASTIC PROPERTIES OF CALCIUM MOLYBDATE CRYSTALS

The dependence of the photoelastic properties of calcium molybdate crystals on the direction of polarization of diffracted light was determined by the Dixon method in the Bragg diffraction of light on acoustic waves. Light diffraction geometries are revealed that allow the maximum and minimum values of the acousto-optic M_2 -factor.

Монокристаллы молибдата кальция (CaMoO_4) [1] широко используются в акустооптических устройствах, эффективность которых зависит от коэффициента акустооптического качества при различных геометриях Брэгговской дифракции света на звуке. Эти зависимости исследованы нами при взаимодействии света с продольными и поперечными акустическими волнами, распространяющимися в кристаллах молибдата кальция в кристаллографической плоскости (001). В частности, определен коэффициент акустооптического качества M_2 , который был введен Диксоном [2] в качестве характеристики эффективности Брэгговской дифракции на акустических волнах:

$$M_2 = \frac{n_1^3 n_2^3 p_{\alpha\beta}^2}{\rho V^3} \quad (1)$$

где n_1 и n_2 - коэффициенты преломления падающего и дифрагированного света, соответственно, ρ - плотность, V - скорость акустической волны.

Эффективная фотоупругая постоянная, $p_{\alpha\beta}$ в соотношении (1) является сверткой значений компонент фотоупругого тензора p_{ijkl} рассматриваемого кристалла по нормированным векторам поляризации, соответственно, дифрагированного и падающего света α и β , и направления и поляризации акустической волны k и γ :

$$p_{\alpha\beta} = p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k \kappa_l \quad (2)$$

Таким образом, изменяя направление поляризации падающего света относительно волнового вектора и поляризации акустической волны можно управлять эффективностью Брэгговской дифракции света [3]. На рис.1, представлена зависимость коэффициента M_2 от направления волнового вектора света в плоскости (001).

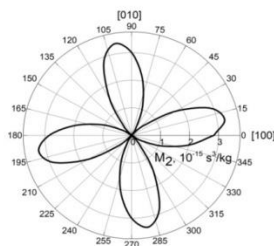


Рис. 1. Зависимость коэффициента акустооптического качества от направления поляризации света в плоскости (001), при дифракции света на продольных волнах вдоль [001] в кристаллах CaMoO_4 .

Как видно из рисунка 1, изменяя направление поляризации падающего света, можно управлять величиной коэффициент акустооптического качества и, соответственно, эффективностью Брэгговской дифракции света.

Список литературы

1. Najafvandzadeh, N., López-Moreno, S., Errandonea, D., Pavone, P., Draxl, C. // Materials Today Communications. 2020. V. 24. P. 101089.
2. R.W. Dixon. // IEEE Trans, V. ED-17. 1980, №1, p. 229-235.
3. С.Н. Антонов., А.В. Вайнер, В.В. Проклов., Ю.Г. Резвов. // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 9. С. 104-109.

А.В. ВИНОГРАДОВА^{1,2}, И.А. БАЗУЛИН^{1,3}, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹, К.А. РОГОЗИН^{1,3}, А.А. КОНЬКОВ¹, А.С. МЯЗИН¹

¹Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия

²ОАО «ВТИ», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНОК НИОБИЯ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И СПЕКТРОСКОПИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В данной работе рассматривается комплексный анализ трех ультратонких мишеней *Nb* и *NbN*. Мишени исследуются по средствам двух видов спектроскопий – рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и спектроскопии характеристических потерь энергии отраженных электронов (СХПЭОЭ). Последовательное применение данных спектроскопических методов позволяет получить более точную информацию об исследуемых образцах.

A.V. VINOGRADOVA^{1,2}, I.A. BAZULIN¹, A.V. LUBENCHENKO¹, K.A. ROGOZIN¹, A.A. KONKOV¹, A.S. MYAZIN¹

¹National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute), Moscow, Russia

²OAO «VTI», Moscow, Russia

INVESTIGATION OF ULTRATHIN NIOBIUM FILMS BY X-RAY PHOTOELECTRON SPECTROSCOPY AND REFLECTED ELECTRON ENERGY LOSS SPECTROSCOPY

In this paper, a complex analysis of three ultrathin targets *Nb* and *NbN* is considered. The targets are studied by means of two types of spectroscopy – X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and reflected electron energy losses spectroscopy (REELS). Consistent application of these spectroscopic methods makes it possible to obtain more accurate information about the samples under study.

Тонкая пленка представляет собой двумерный слой материала, нанесенный на подложку с целью достижения свойств, которые не могут быть легко достигнуты или вообще не реализованы одним и тем же материалом в его объемной форме [1]. Толщина является одним из важных параметров тонких пленок, так как от этого зависят ее свойства.

В данной работе используется комплексный анализ, в ходе которого применяются последовательно методы РФЭС и СХПЭОЭ. С помощью СХПЭОЭ получены данные о неупругих рассеяниях, после чего эти данные используются в РФЭС. Исследование РФЭС-спектров дает достаточно точные данные об упругих рассеяниях.

На первом этапе подбирались неупругие параметры мишени №1 (*Nb*, *d*=10 нм) для ультратонкой оксидной пленки *Nb₂O₅* из ХПЭОЭ спектров. Затем эти параметры передавались на следующий этап, на котором еще определялись неупругие параметры для тонкой пленки *NbN* образца №2 (*NbN*, *d*=50 нм) из ХПЭОЭ спектров. Для мишени №3 (*NbN*, *d*=6 нм) передались неупругие параметры от мишеней №1 и №2. Следующий этап – разложение РФЭС спектров для образца №3. При процедуре вычитания фона использовались неупругие параметры, полученные из ХПЭОЭ спектров для мишени №3. Заключительный этап – проведение послойного анализа. На рис. 1(а-в) изображен подобранный из неупругих параметров фон для образцов №1-3.

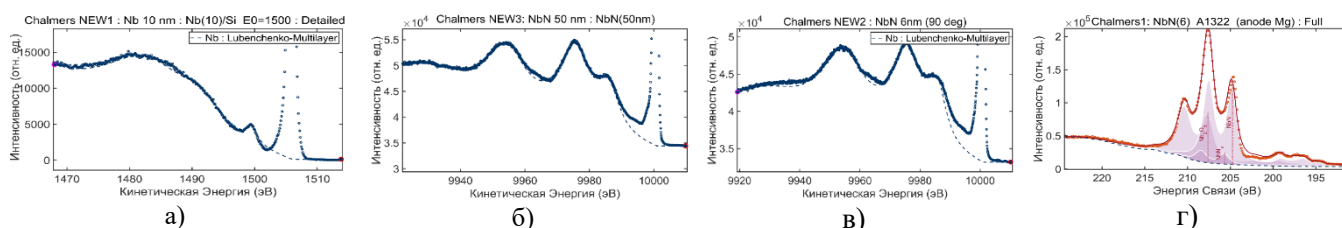


Рис. 1. Подобранный из неупругих параметров фон: а) – фон образца №1; б) – фон для образца №2; в) – фон для образца №3; г) – разложение линии *Nb 3d* мишени №3

Следующий этап – исследование РФЭС спектров образца №3. Проводится разложение спектральных линий (рис.1 г). Далее рассчитывалась толщина оксидного слоя *Nb₂O₅* мишени №3.

В дальнейшем подобная методика исследования позволит получать комплексную информацию об образце. Исследование наноструктур станет более точным.

Список литературы

1. Kumar S., Aswal D. K. (ed.). Recent Advances in Thin Films. – 2020.