

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

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

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Часть 1

Москва

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

ББК 72

М 43

VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021: Сборник научных трудов. Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – 460 с.

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

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

Ответственный редактор: Крупышева П.О.

ISBN 978-5-7262-2767-2

©Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2021

Подписано в печать. Формат

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

Программный комитет конференции

- Гаранин Сергей Григорьевич – академик РАН, директор Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ -- председатель Программного комитета
- Кузнецов Андрей Петрович – д.ф.-м.н., директор Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ – зам. председателя Программного комитета
- Батани Дино Димитри – Университет Бордо, Франция
- Бармаков Юрий Николаевич – д.т.н., первый заместитель научного руководителя ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, и.о. директора Института физико-технических интеллектуальных систем НИЯУ МИФИ
- Гарнов Сергей Владимирович – член-корр. РАН, директор Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, научный руководитель Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ
- Губин Сергей Александрович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Химическая физика» НИЯУ МИФИ
- Евтихий Николай Николаевич – заместитель генерального директора ООО «НТО «ИРЭ-ПОЛЮС», заведующий кафедрой «Лазерная физика» НИЯУ МИФИ
- Ильяев Радий Иванович – академик РАН, почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ
- Колачевский Николай Николаевич – член-корр. РАН, директор Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
- Кудряшов Николай Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика» НИЯУ МИФИ
- Менушенков Алексей Павлович – д.ф.-м.н., профессор, и .о. заведующего кафедрой «Физика твердого тела и наносистем» НИЯУ МИФИ
- Попруженко Сергей Васильевич – д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ
- Пуранс Юрис – д.ф.-м.н, профессор, член Латвийской Академии Наук, Университет Латвии
- Смирнов Валентин Пантелеймонович – академик РАН, АО «Наука и инновации» ГК Росатом
- Сон Эдуард Евгеньевич – академик РАН, руководитель НИЦ-4 Объединенного института высоких температур РАН
- Фертман Александр Давидович – к.ф.-м.н, директор по науке Кластера ядерных технологий Фонда «Сколково»

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

Организационный комитет конференции

- Кузнецов А.П. – директор Института ЛаПлаз, НИЯУ МИФИ, председатель Организационного комитета
- Генисаретская С.В. – заместитель директора Института ЛаПлаз, НИЯУ МИФИ, заместитель председателя Организационного комитета
- Борисюк П.В. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ, член Организационного комитета
- Гаспарян Ю.М. — доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Городничев Е.Е. – профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Губский К.Л. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Гусарова М.А. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Казиева Т.В. – старший преподаватель отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Кузнецов А.В. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Маклашова И.В. — старший преподаватель кафедры №4 НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Масленников С.П. – профессор кафедры №24 НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета

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

Содержание

Содержание.....	5
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ.....	32
А.Я. ДЗЮБЛИК <u>ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАЗРЯДКА ЯДЕРНЫХ ИЗОМЕРОВ ЛАЗЕРАМИ</u>	33
Г.А. АГЕЕВ, П.В. БОРИСЮК <u>ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕ-ГИРОВАННОГО КРЕМНИЙ-ОРГАНИЧЕСКОГО ЩЕЛЕВОГО ВОЛНОВОДА</u>	35
Д.В. БОРТКО, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ, Ю.Ю. ЛЕБЕДИНСКИЙ, К.М. БАЛАХНЕВ <u>ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЁНОК ИЗ НАНОКЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА И ЕГО ОКСИДА, ИМЕЮЩИХ СТРУКТУРУ CORE-SHELL</u>	37
М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, С.А. ЗИБРОВ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, В.П. ЯКОВЛЕВ <u>ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТЫ КПН-РЕЗОНАНСА ОТ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ</u>	40
С.А. ЗИБРОВ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ, А.Е. ДРАКИН, Д.А. ШИРЯЕВ, Е.А. ЦЫГАНКОВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ, А.П. БОГАТОВ <u>МОДУЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИНАМИЧЕСКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ МОД ДИОДНОГО ЛАЗЕРА С ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ</u>	42
К.П. ГАЛСТЯН, Е.В. ВИЛЬШАНСКАЯ, Н.В. МОРОЗОВ, Б.Б. ЗЕЛЕНЕР <u>НАБЛЮДЕНИЕ И АНАЛИЗ КОГЕРЕНТНОГО</u>	

ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТИ В СИСТЕМЕ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ-40 С ДОПЛЕРОВСКИМ УШИРЕНИЕМ	44
А.И. МАГУНОВ, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ_ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКИ СВЕРХТОНКИХ ПОДУРОВНЕЙ АТОМОВ РУБИДИЯ-87 И ЦЕЗИЯ -133	46
С.М. ИГНАТОВИЧ, М.Н. СКВОРЦОВ, В.И. ВИШНЯКОВ, Н.Л. КВАШНИН, В.А. ВАСИЛЬЕВ, Д.В. БРАЖНИКОВ, В.И. ЮДИН, А.В. ТАЙЧЕНАЧЕВ, С.Н. БАГАЕВ, И.Ю. БЛИНОВ, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ, Ю.С. САМОХВАЛОВ ⁴ , Д.А. ПАРЁХИН, Е.А. ЗОТОВ, М.П. МАЛАХ, Ф.Р. СМИРНОВ_РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ И БОРТОВЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СВЕРХМИНИАТЮРНОГО КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ.....	48
Д.И. ПРОВОРЧЕНКО. Д.А.МИШИН, Д.О.ТРЕГУБОВ, Е.С. ФЕДОРОВА, А.А.ГОЛОВИЗИН, В.Н.СОРОКИН, К.Ю.ХАБАРОВА, Н.Н.КОЛАЧЕВСКИЙ_ПОДГОТОВКА К РЕАЛИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ ТУЛИЯ НА СПЕКТРАЛЬНО УЗКОМ ПЕРЕХОДЕ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 506 НМ.....	50
Д.В. СУТЫРИН, А.В. СЕМЕНКО, Г.С. БЕЛОТЕЛОВ, С.Н. СЛЮСАРЕВ_КОМПЛЕКС МИКРОГРАВИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ КВАНТОВЫХ СЕНСОРОВ НА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМАХ.....	52
В. Н. СМИРНОВ, И. А. СЕМЕРИКОВ, И. В. ЗАЛИВАКО, А. С. БОРИСЕНКО, М. Д. АКСЕНОВ, П. А. ВИШНЯКОВ, П. Л. СИДОРОВ, Н. В. СЕМЕНИН, И. А. ЖУРАВЛЕВ, К. Ю. ХАБАРОВА, Н. Н. КОЛАЧЕВСКИЙ_КВАНТОВЫЕ ОПЕРАЦИИ НА СВЕРХТОНКОЙ СТРУКТУРЕ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ ИОНА ИТТЕРБИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРУПОЛЬНОГО ПЕРЕХОДА.....	54

П.В. БОРИСЮК, Е.Ю. ТЕЛЬНОВ, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.О. ТРЕГУБОВ_ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТР ИОНОВ ТОРИЯ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ.....	56
Д.О. ТРЕГУБОВ, А.А. ГОЛОВИЗИН, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А.МИШИН, К.Ю. ХАБАРОВ, В.Н. СОРОКИН, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ_СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ АТОМОВ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ.....	59
Э. О. ЧИГЛИНЦЕВ, К. С. КУДЕЯРОВ, Н. О. ЖАДНОВ, Д. С. КРЮЧКОВ, Г. А. ВИШНЯКОВА, К. Ю. ХАБАРОВА, Н. Н. КОЛАЧЕВСКИЙ_СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ПО КРЕМНИЕВЫМ РЕЗОНАТОРАМ С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЗЕРКАЛАМИ GaAs/AlGaAs.....	61
К.С. КУДЕЯРОВ, Г.А. ВИШНЯКОВА, Э.О. ЧИГЛИНЦЕВ, Н.О. ЖАДНОВ, Д.С. КРЮЧКОВ, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ_ПЕРЕДАЧА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЧАСТОТЫ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1550 НМ ПО КОРОТКОМУ УЛЬТРАСТАБИЛЬНОМУ АТМОСФЕРНОМУ КАНАЛУ.....	63
Е.А. ЦЫГАНКОВ, С.А. ЗИБРОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, Д.С. ЧУЧЕЛОВ, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ, В.П. ЯКОВЛЕВ_МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТООПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В РАДИОЧАСТОТНОЙ ГРЕБЁНКЕ ЧАСТОТ.....	65
А.Е. ШЕПЕЛЕВ, А.Г. ПУТИЛОВ, А.В. ОСИПОВ, А.А. АНТИПОВ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	67
Н.В. МОРОЗОВ, К.П. ГАЛСТЯН, Е.В. ВИЛЬШАНСКА, Б.Б. ЗЕЛЕНЕР_РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УДВОЕНИЯ ЧАСТОТЫ ИК-ЛАЗЕРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ КАЛЬЦИЯ-40 НА УЗКОМ ПЕРЕХОДЕ.....	69

А.В.ВАСИЛЬЕВ, А.А. ФРОНЯ, В.Н. ПУЗЫРЕВ, А.Т. СААКЯН, А.Н. СТАРОДУБ СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПЗС-МАТРИЦЫ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ	71
P.M. MATYAKUBOVA, R.R. KULUYEV _TECHNOLOGICAL PROCESS OF CONVECTIVE DRYING OF BULK MATERIALS ...	73
P. M. MATYAKUBOVA, P. R. ISMATULLAYEV, N. I. AVEZOVA, M.M. MAHMADJONOV _SELECTION OF THE MAIN ELEMENTS OF THE TPVZHМ LIQUID MOISTURE CONTENT THERMAL TRANSDUCERS	77
P. M. MATYAKUBOVA, SH.A. QODIROVA, M.M. MAHMADJONOV _THE APPLICATION OF INFRARED SPECTROSCOPY IN SCIENCE AND TECHNOLOGY	84
Секция ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	90
A. BISWAS _CUBIC-QUARTIC OPTICAL SOLITON PERTURBATION WITH LAKSHMANAN-PORSEZIAN-DANIEL MODEL BY SEMI-INVERSE VARIATIONAL PRINCIPLE	91
А.В. АКСЕНОВ, К.П. ДРУЖКОВ _О СООТВЕТСТВИИ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ УРАВНЕНИЙ МЕХАНИКИ ПРИ ЛАГРАНЖЕВОМ И ЭЙЛЕРОВОМ ОПИСАНИИ.....	93
С.Н.АНДРИАНОВ _____ НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОСТИ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....	94
Е.В. АНТОНОВА, Н.А. КУДРЯШОВ _РЕШЕНИЕ В ВИДЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ И УЕДИНЕННЫХ ВОЛН ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА	96
И.Н. АРАПОВ, Ю.Н. БУХАРЕВ _РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ АЛГОРИТМОВ И МОДЕЛЕЙ ПП ЛОГОС НА ПРИМЕРАХ РЕШЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ЗАДАЧ УДАРА СТЕРЖНЕВЫХ УДАРНИКОВ ПО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПРЕГРАДАМ.....	98

С.П.БАУТИН, Ю.В.НИКОЛАЕВ _____ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОГО СЖАТИЯ ГАЗА ИЗ ПОКОЯ В ПОКОЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК	100
С.П. БАУТИН, Е.И. ПОНЬКИН_ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОЙНОЙ ВОЛНЫ СУЧКОВА, ДАЮЩИЕ ОПИСАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МИШЕНЬ	102
К.В. БРУШЛИНСКИЙ, Е.В. СТЕПИН_О ПОДХОДАХ К ИССЛЕДОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ-ГАЛАТЕЯХ	104
В.С. ДРЮМА_ОБ ИНТЕГРИРОВАНИИ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В ПЕРЕМЕННЫХ ЛАГРАНЖА	106
В.В. ИВАНОВ, В.В. ИВАНОВ, А.В. КРЯНЕВ, А.С. ПРИКАЗЧИКОВА, И.И. ТАТАРИНОВ_К ВОПРОСУ ОБ ИМИТАЦИИ DDOS АТАКИ В МАГИСТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ .	108
В.Л. КАМЫНИН_ОБ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСЯЩЕГО ОТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ МЛАДШЕГ КОЭФФИЦИЕНТА В ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ СО СЛАБЫМ ВЫРОЖДЕНИЕМ	110
К.В. КАН, Н.А. КУДРЯШОВ_УЕДИНЕННЫЕ ВОЛНЫ, ОПИСЫВАЕМЫЕ СИСТЕМОЙ УРАВНЕНИЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА ДЛЯ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ	112
В.К. КОЗЛОВ, М.А. ЧМЫХОВ_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ SIMPLE И RIMPLE ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ	114
О.К.КРОЙТОР, М.Д. МАЛЫХ_____ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	116

А.А. БАЦУЛИН, В.В. БОЧКАРЕВ, Б.Д. БРИЛЛИАНТОВ, С.Г. КЛИМАНОВ, А.В. КРЯНЕВ, В.И. ТЕРЕШКИН МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕВОГО ГРАФИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ	118
В.В. КУЗЕНОВ, А.В. РУДИНСКИЙ, С.В. РЫЖКОВ, Д.А. ЯГОДНИКОВ _____ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ И СОПЛОМ БЛОКЕ ЖРД С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ	120
С.Ф.ЛАВРОВА, Н.А.КУДРЯШОВ _____ НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ДУФФИНГА	122
А.С. ЛЕОНОВ, О.В. НАГОРНОВ, С.А. ТЮФЛИН_ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭПИДЕМИИ COVID-19	124
С.В. МЕЛЕШКО, Э. ШУЛЬЦ_ОБОБЩЕННЫЕ ПРОСТЫЕ ВОЛНЫ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ, ЗАПИСАННЫХ В ИНВАРИАНТАХ РИМАНА	126
А.С. МОКЕЕВ, В.М. ЯМЩИКОВ_СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛОСКИМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ТОНКОЙ ЛИНЗЫ.....	127
Р.В. МУРАТОВ, Н.А. КУДРЯШОВ, П.Н. РЯБОВ_ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ.....	129

М.А. ПИКАЛОВА <u>МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ</u>	131
В.М.РУДЕНКО, Е.В.КОРОТКОВ <u>ПОИСК СЛАБО ПОДОБНЫХ ТАНДЕМНЫХ ПОВТОРОВ В АМИНОКИСЛОТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ БЕЛКОВ С УЧЕТОМ ПАРНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ</u>	132
Д.В. САФОНОВА, Н.А. КУДРЯШОВ <u>ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ ДИСПЕРСИЕЙ</u>	134
А.Г. СБОЕВ, А.А. СЕЛИВАНОВ, Р.Б. РЫБКА, И.А. МОЛОШНИКОВ, Г.В. РЫЛЬКОВ, С.Г. СБОЕВА <u>БАЗОВЫЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СВЯЗЕЙ НАЗВАНИЯ МЕДИКАМЕНТА (DRUGNAME) С ЕГО ПОБОЧНЫМ ЭФФЕКТОМ (ADR) В ОТЗЫВАХ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ</u>	136
А.Г. СБОЕВ, Ю.А. ДАВЫДОВ, Р.Б. РЫБКА <u>НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПЕРЕВОДА ТЕКСТОВЫХ КОМАНД МОБИЛЬНОМУ РОБОТУ НА ЕСТЕСТВЕННОМ РУССКОМ ЯЗЫКЕ В СЕМИОТИЧЕСКИЙ ФОРМАТ RDF</u>	138
А.Г. СБОЕВ, А.А. СЕЛИВАНОВ, Р.Б. РЫБКА, И.А. МОЛОШНИКОВ, А.В. ГРЯЗНОВ <u>О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЗЮМИРОВАНИЯ ТЕКСТОВ НА БАЗЕ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ</u>	140
А. Г. СБОЕВ, Н. А. КУДРЯШОВ, А. В. СЕРЕНКО, Р. Б. РЫБКА <u>АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ SIR ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ ВОЛН КОРОНАВИРУСА В РАЗНЫХ РЕГИОНАХ</u>	142

С.А. ТАЧИЛИН _____ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ.....	144
А.В. ТЕТЕРЕВ, И.М. КОЗЛОВ, Л.В. РУДАК, Н.И. МИСЮЧЕНКО КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДА ОТ ГОРЕНИЯ К ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В УДАРНЫХ ТРУБАХ.....	146
А.В. ТЕТЕРЕВ, Л.К. СТАНЧИЦ, Л.В. РУДАК, Н.И. МИСЮЧЕНКО МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ВОКРУГ ТЕЛ, ЛЕТЯЩИХ С ГИПЕРЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ	148
Э.Ф. ХАФИЗОВА, Н.А. КУДРЯШОВ__ОБОБЩЕННЫЕ ПОЛИНОМЫ ЭРМИТА И АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ИЕРАРХИИ БЮРГЕРСА	150
В.В. ЦЕГЕЛЬНИК_О ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ БЕКЛУНДА ДВУХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА ПЕНЛЕВЕ-ТИПА	152
А.А. КУТУКОВ, Н.А. КУДРЯШОВ, А.С. ПРИКАЗЧИКОВА ПЕРИОДИЧЕСКИЕ И УЕДИНЕННЫЕ ВОЛНЫ, ОПИСЫВАЕМЫЕ УРАВНЕНИЕМ БИСВАСА-АРШЕДА ДЛЯ ИМПУЛЬСОВ В СВЕТОВОДЕ С ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕМ	154
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ	156
Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, И.В. АНИЩЕНКО, С.В. ВЕСЕЛОВА М.С. НОВИКОВ, И.А. РУДНЕВ ¹ _РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СОРС КАБЕЛЕ.....	157

Ю.В.АГРАФОНОВ, И.С.ПЕТРУШИН _____ЛИНЕЙНОЕ ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ	159
А.К. АЙМУХАНОВ, К.С. РОЖКОВА, Д.С. КАМБАР_ВЛИЯНИЕ ПАРОВ СПИРТОВ НА МОРФОЛОГИЮ ПЛЕНОК PEDOT:PSS ПРИ ОТЖИГЕ В ИНЕРТНОЙ АТМОСФЕРЕ	161
Н.М.-Р. АЛИХАНОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, С.А. САДЫКОВ,С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ,М.В. ИЛЬИЧЕВ, Р.М. ЭМИРОВ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОПОРОШКОВ $WFeO_3$, ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	163
Д.В. АЛЯБЬЕВ,И.Д. ЯДГАРОВ, У.Б. УЛЖАЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТОРЦЕВОГО РАССЕЙЯНИЯ АТОМОВ ВОДОРОДА НА ПУЧКАХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК	165
И.В. АНИЩЕНКО, С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРОНТА ПРОНИКНОВЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ВТСП КОМПОЗИТЫ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ И ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ....	167
И.В. АНИЩЕНКО, С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА В НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЯХ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ.	169
А.А. АНТИПОВ, А.Г. ПУТИЛОВ, А.В. ОСИПОВ, А.Е. ШЕПЕЛЕВ ФОРМИРОВАНИЕ АНСАМБЛЕЙ ВЫСОКООТРАЖАЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ.....	171
М.Н. АНТОНЮК, К.А.КУПЦОВ, А.Н. ШЕВЕЙКО, Д.В. ШТАНСКИЙ _____КОРРОЗИОННЫЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Fe-Co-Cr-Ni-Cu В МОРСКОЙ ВОДЕ.	173

И.В. АНТОНОВА, М.Б.ШАВЕЛКИНА, А.И. ИВАНОВ, Р.А. СООТС, П.П. ИВАНОВ_КОМПОЗИТЫ PEDOT:PSS: ГРАФЕН, СИНТЕЗИРОВАННЫЙ В ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЯХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ	175
Б.А. БАЙТИМБЕТОВА, Ю.А. РЯБИКИН, А. КЫДЫРБАЙ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАФЕНОВЫХ СТРУКТУР	177
П.И. БЕЗОТОСНЫЙ, К.А. ДМИТРИЕВА, С.Ю. ГАВРИЛКИН, А.Н. ЛЫКОВ, А.Ю. ЦВЕТКОВ_ОБОБЩЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПЛЕНОК И ИХ ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ.....	179
К.А. БОРОДАКО, А.В. ШЕЛЯКОВ, Н.Н. СИТНИКОВ, О.Н.СЕВРЮКОВ, И.А. ЗАЛЕТОВА_ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ И ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВАХ TiNiCu	181
С.В. ВЕСЕЛОВА, Д.А. АБИН, И.В. АНИЩЕНКО, С.В. ПОКРОВСКИЙ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ, И.А. РУДНЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОНЕСУЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ.....	183
Е.А. ВИЛКОВ, С.Г. ЧИГАРЕВ, И.В. МАЛИКОВ, Л.А.ФОМИН СПЕКТРЫ ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЯ В МАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДАХ Fe/Mo И Fe/Co ₂ FeAl.....	185
Д.М. ВОРОПАЕВ, А.В. ФРОЛОВ, А.П. ОРЛОВ, А.А.СИНЧЕНКО ТОКОВО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПИННИНГА ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ В КВАЗИДВУМЕРНОМ СОЕДИНЕНИИ TbTe ₃	187

А.А.ВОРОШНИНА, И.С.МЕРЕНКОВ _____ УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ НАНОСТЕНОК h-BN ЧЕРЕЗ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ДОПИРОВАНИЕ АТОМАМИ КИСЛОРОДА.....	189
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, А.Э. РАБАДАНОВА, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ, Д.К. ПАЛЧАЕВ, М.Х. ГАДЖИЕВ, Р.М. ЭМИРОВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, М.В. ИЛЬИЧЕВ, П.М. САЙПУЛАЕВ. ВЛИЯНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ ВИСМУТА ЛАНТАНОМ НА СТРУКТУРУ КЕРАМИКИ VFeO_3	191
Л.Д. ГВАРИШВИЛИ, И.В. ЩЕТИНИН, Т.Р. НИЗАМОВ, П.С. МОГИЛЬНИКОВ, И.Г. БОРДЮЖИН _____ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕКСАФЕРРИТА СТРОНЦИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	193
А.В. ГОРЯЧЕВСКИЙ, Л.П. СУХАНОВ _____ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САМООРГАНИЗОВАННЫХ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК ПОЛЯРНЫХ МОЛЕКУЛ $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$	195
В.А. ГРИГОРЬЕВ, П.В. КОНАРЕВ, А.В. БУЗМАКОВ, Д.А. ЗОЛОТОВ _____ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ПОЛУПЕТЛЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ В МОНОКРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ ТОПО-ТОМОГРАФИИ	197
М.Д. ГРИЦКЕВИЧ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, В.Н. НЕВОЛИН, В.Ю. ФОМИНСКИЙ _____ ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ Mo-S-C-N , ФОРМИРУЕМЫХ РЕАКЦИОННЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ.....	199
К.С. ГРИШАКОВ, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО _____ УСТОЙЧИВАЯ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ НОВАЯ ФАЗА ПОЛИМЕРНОГО АЗОТА	201

Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, К.С. ГРИШАКОВ_СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ГИДРИД ГЕРМАНИЯ СО СТРУКТУРОЙ A15	203
БИ ДУНСЮЭ, У МЭНЮАНЬ, А. КАРАДЖИЧ, В.В. ФИЛАТОВ ГЛОБУЛЯРНЫЙ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ.....	205
И.А. ЗАВИДОВСКИЙ, О.А. СТРЕЛЕЦКИЙ, О.Ю. НИЩАК, А.А. ХАЙДАРОВ_ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ИОННОЙ СТИМУЛЯЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОД-СЕРЕБРЯНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ.....	207
А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ, Г.И. ОМАРБЕКОВА, Т.Е. СЕЙСЕМБЕКОВА ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК PEDOT:PSS ПРИ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРА В ПАРАХ СПИРТОВОГО РАСТВОРИТЕЛЯ	209
Э.М. ИБРАГИМОВА, Ш.Н. БУЗРИКОВ, М.А. МУССАЕВА_РОСТ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКА NaCl ПРИ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ	211
Н.А. ИВАНОВА, А.А. ЗАСЫПКИНА, Е.В. ЯСТРЕМСКИЙ, Р.А. КАМЫШИНСКИЙ, В.В. ТИШКИН, О.К. АЛЕКСЕЕВА НАНЕСЕНИЕ Ti-ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КИСЛОРОДНОГО ЭЛЕКТРОДА ОБРАТИМОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ.....	213
Х.М. ИЛИЕВ, М.О. ТУРСУНОВ,С.А. ТАЧИЛИН ¹ _ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ МАРГАНЦЕМ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ КИСЛОРОДА В КРЕМНИИ.....	215
Э.З. ИМАМОВ, Р.А. МУМИНОВ, Х.Н. КАРИМОВ, М.А. АСКАРОВ_КРЕМНИЕВЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ С НАНО РАЗМЕРНЫМИ ГЕТЕРОПЕРЕХОДАМИ.....	217

Р.Ш. ИХСАНОВ, Е.А. МАЗУР, М.Ю. КАГАН_КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ЭЛИАШБЕРГА НА МНИМОЙ ОСИ.....	219
С.Б. КАБИЛДИНА, А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ_ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ Zr-B-N, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ DCMS И HIPIMS.....	221
М.Ю. КАГАН, Е.А. МАЗУР_БОЗОННЫЙ МЕТАЛЛ В ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ С ПРИТЯЖЕНИЕМ В ПРИСУТСТВИИ СИЛЬНОГО СЛУЧАЙНОГО ПОТЕНЦИАЛА.....	223
В.А. КАЗАКОВ, А.Г. РАЗИНА, А.В. КОКШИНА_КАТОДНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ СЕРЕБРА С АМОРФНЫМ УГЛЕРОДОМ.....	225
П.Ф. КАРЦЕВ_ДИНАМИКА АННИГИЛЯЦИИ АТОМОВ ПАРАПОЗИТРОНИЯ В СОСТОЯНИИ БОЗЕ-КОНДЕНСАТА ...	227
О.В. КАШУРНИКОВА_АНАЛИЗ EXAFS-СПЕКТРОВ ГАФНАТОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ (DY, GD, LA) МЕТОДОМ ОБРАТНОГО МОНТЕ-КАРЛО.....	229
А.О. КИРИЛЛОВ, Р.Д. КАПУСТИН, В.И. УВАРОВ_ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНВЕРТЕРОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ДЕГИДРИРОВАНИЯ ЭТИЛБЕНЗОЛА В СТИРОЛ.....	231
Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Д. СЫТЧЕНКО ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ Mo-(Zr,Hf)-Si-B, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HIPIMS	233
Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Д. СЫТЧЕНКО, П. ЛОГИНОВ, А. ОРЕХОВ, А.В. БОНДАРЕВ, Е.А. ЛЕВАШОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ, ПРОХОДЯЩИХ В	

ПЛЁНКАХ ZrMoSiB ПРИ 20-1000°C, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ HRTEM, SAED, FFT, XRD, NHT, FTIR, XPS иRS.....	235
Н.А. КОЛЬШКИН, А.А. ВЕЛИГЖАНИН_AXRDCalc – ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ АНОМАЛЬНОЙ ДИФРАКЦИИ НА PУТНОН	237
В.О. КОПЫТСКИЙ, Е.В. ПЕТРОВ, С.Н. БУРАВОВА_ИЗУЧЕНИЕ ОТКОЛЬНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В БРОНЗЕ ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ.....	239
В.О. КОПЫТСКИЙ, Е.В. ПЕТРОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯСТАЛИ 09Г2С ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ С ПОРОШКАМИ W, TiC, Ni.....	241
А.М. КОХХАРОВ, С.А. БАХРАМОВ, У.К. МАХМАНОВ, Ш.А. ЭСАНОВ, Б.А. АСЛАНОВ, З. БЕКМУРОДОВ, Б.А. СИНДАРОВ ПОЛУЧЕНИЕ НАНОТРУБОК ФУЛЛЕРЕНА C ₆₀ В ОБЪЕМЕ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ РАСТВОРА	243
К.А. КУПЦОВ, А.Н. ШЕВЕЙКО, Д.А. СИДОРЕНКО, Д.В. ШТАНСКИЙ_ГИБРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ TiC/C НА ТИТАНЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ТРИБОКОРРОЗИИ.....	245
А.Е. КРЮКОВА, П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ_УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ ВЫТЯНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ	247
М.Ш. КУРБАНОВ, М. ЭРНАЗАРОВ, С.А. ТУЛАГАНОВ, Х.К. РАШИДОВ_ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ФТОРИДНЫМ МЕТОДОМ.....	249

М.Ш. КУРБАНОВ, Б.М. АБДУРАХМАНОВ, У.М.НУРАЛИЕВ, У.Н. РУЗИЕВ_ СИНТЕЗ НАНОПОРОШКОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА.....	251
М.Ш. КУРБАНОВ, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР_ ТЕХНОЛОГИЯ БРИКЕТИРОВАНИЯ И НАНОФРАКТАЛЫ.....	253
Р.Т. КУРБАНОВ, З.А ИСАХАНОВ, З.А. МУХТАРОВ, Р.М. ЁРКУЛОВ,А.А. АХМЕДОВ_ОБРАЗОВАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ	255
М.Н. ЛАРИЧЕВ, Н.С. ШАЙТУРА, В.В. АРТЕМОВ_ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО КЛАССА 2D НАНООБЪЕКТОВ -ОБОЛОЧЕК ПУЗЫРЕЙ С НАНОРАЗМЕРНОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.....	257
А.Н. МАЙОРОВ, В.Я. НИКУЛИН, А.Б. МИХАЙЛОВА, П.В. СИЛИН, И.В. БОРОВИЦКАЯ, Б.П. МИХАЙЛОВ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ	259
П.Е. ЛИТВИНОВА, И.А. КАМЕНСКИХ, Р.Д. СВЕТОГОРОВ, А.В. ЕГОРЫШЕВА, Е.Ф. ПОПОВА_ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СЛОЖНЫХ АНТИМОНАТОВ И ТАНТАЛАТОВ РЗЭ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ ПОРОШКОВОЙ ДИФРАКЦИИ НА СИНХРОТРОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ	261
М.Ю. ЛУКЪЯНОВ, А.Г.М. АХМЕД, А.А. БУШ, А.С. ПРОХОРОВ, В.Б. АНЗИН, В.А. АБАЛМАСОВ, Б.П. ГОШУНОВ, Л.Н. АЛЯБЬЕВА_ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ЗАМЕЩЕНИЯ НА ТЕРАГЕРЦОВУЮ ЭЛЕКТРОДИНАМИКУ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ	263

Г.Х. МАВЛОНОВ, С.А. ТАЧИЛИН, Э. ШУКУРОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С МАГНИТНЫМИ НАНОКЛАСТЕРАМИ АТОМОВ МАРГАНЦА	265
А.Н. МАКСИМОВА, И.А. РУДНЕВ, В.А. КАШУРНИКОВ ¹ ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕВОЙ РЕШЕТКИ СЛОИСТОГО СВЕРХПРОВОДНИКА С ДЕФЕКТАМИ В ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА	267
А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ, В.А. КАШУРНИКОВ ¹ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАМАГНИЧЕННОСТИ ВТСП В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛЯ МАГНИТНОЙ ДОРОЖКИ.....	269
А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ, И.А. РУДНЕВ, А.Н. МАКСИМОВА_ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИМПУЛЬСНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ ВТСП С РАЗЛИЧНЫМИ КОНФИГУРАЦИЯМИ ПИННИНГА.	271
Ж.Х. МУРЛИЕВА, Р.М. ЭМИРОВ,М.Х. РАБАДАНОВ, М.Э. ИСХАКОВ, Д.К. ПАЛЧАЕВ_ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $Ti_{67}Al_{33}$ ПОСЛЕ ЗАКАЛОК ОТ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР	273
Н.Н. НИЁЗБЕКОВ, И.В. САЙКОВ, А.Ю. МАЛАХОВ, И.В. ДЕНИСОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ СОЕДИНЕНИЯ АМГ6– А0–Ст.3 ПОСЛЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	275
А.В. ОСИПОВ, А.А. АНТИПОВ, А.Г. ПУТИЛОВ, А.Е. ШЕПЕЛЕВ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН ПРИ СИНТЕЗЕ НАНОЧАСТИЦ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ	277
Д.К. ПАЛЧАЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА,М.Х. РАБАДАНОВ, А.Э. РАБАДАНОВА	

ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ ДОПИРОВАНИЯ НАНОКЕРАМИКИ УВСО ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ	279
С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.В. АНИЩЕНКО, Д.А. АБИН, Д.В. САВЧЕНКОВ, И.А. РУДНЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ МИКРОННОГО РАЗМЕРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ	281
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, С.Г. РУДАКОВ, Н.В. БОЙКО, Н.В. ОГНЕВСКАЯ, Н.А. ЦАРЕНКО, О.Н. СЕРЕГИНА, Л.Т. МАКАРОВА, И.В. ЩЕТИНИН_ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРУ ПОРОШКОВ $\text{BaV}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq X \leq 1$)	283
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, С.Г. РУДАКОВ, Ф.Э. ДУБЯГО, Н.В. ОГНЕВСКАЯ, Н.А. ЦАРЕНКО, О.Н. СЕРЕГИНА, Н.Е. БАБЕНКОВА, И.В. ЩЕТИНИН ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ $\text{XRO}_{\text{матов}}$ рзэ	285
А.Р. ПРИЩЕПА, А.В. САДАКОВ, А.В. МУРАТОВ_МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ТЕПЛОЁМКОСТИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ	287
А.Э. РАБАДАНОВА, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Д.К. ПАЛЧАЕВ, Р.М. ЭМИРОВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, П.М. САЙПУЛАЕВ_СТРУКТУРА ПЛЕНОК СОСТАВА $\text{WFeO}_3/\text{TlO}_2/\text{Tl}$	289
Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ, В.Н. НЕВОЛИН, Д.В. ФОМИНСКИЙ_ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ НАНОПЛАСТИНЧАТЫХ ПЛЕНОК WSe_2 НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРОКАТАЛИЗА ВОДОРОДА НА ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЕ $\alpha\text{-MoS}_4/\text{WSe}_2$	291
О.В. РУБИНСКОВСКАЯ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, А.А. СОЛОВЬЕВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ_СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТО-АКТИВИРОВАННОЙ ЭВОЛЮЦИИ H_2	

НА НАНО-ИГОЛЬЧАТЫХ ПЛЕНКАХ WO_3 С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ $2H-WS_2$ И АМОРФНЫМИ $\alpha-MoS_xCO$ -КАТАЛИЗАТОРАМИ	293
К.Н. РЫКУН, А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ, И.А. РУДНЕВ ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ПИННИНГА НА ОСТАТОЧНУЮ НАМАГНИЧЕННОСТЬ ВТСП	295
П.С. САВЧЕНКОВ, П.А. АЛЕКСЕЕВ_СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕЙЗЕНБЕРГОВСКОГО АНТИФЕРРОМАГНЕТИКА ($S=1/2$) НА КВАДРАТНОЙ РЕШЁТКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ	297
И.В. САЙКОВ, С.А. СЕРОПЯН, Г.Р. САЙКОВА_РЕАКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ $W-PTF\acute{E}-Al$	299
И.Е. СЕМЕНЧУК, В.А. ЩЕРБАКОВ, А.Н. ГРЯДУНОВ, М.И. АЛЫМОВ_ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И КОНСОЛИДАЦИЯ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $TiC-ZrC$	301
С.А. СЕРОПЯН, И.В. САЙКОВ_ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ РЕАКЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ $Ni-Al$ И $Ni-Al-PTF\acute{E}$	303
Г.В. СИВЦОВА, С.В. САВУШКИНА ^{1,2} , М.В. ГЕРАСИМОВ. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ СПЛАВА Э110 С ДОБАВЛЕНИЕМ В ЭЛЕКТРОЛИТ СУБМИКРОННОГО ПОРОШКА ОКСИДА ИТТРИЯ.....	305
А.А. СИНЧЕНКО, П. МОНСО_МАГНЕТОТРАНСПОРТ В $(TaSe_4)_2I$	307
К.Л. СМИРНОВ_ПРИМЕНЕНИЕ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ В РАЗРАБОТКЕ СИАЛОНОВОЙ КЕРАМИКИ.....	309
Н.Н. СОБОЛЕВА, А.К. СТЕПЧЕНКОВ, А.В. МАКАРОВ_ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТНОГО ОТЖИГА $NiCrBSi$ ПОКРЫТИЯ НА	

ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫДЕРЖКОЙ..	311
А.А. СОЛОВЬЕВ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, О.В. РУБИНКОВСКАЯ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ РЕГУЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СЛОЕВ $a\text{-MoS}_x$ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТО-АКТИВИРОВАННОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ВОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $a\text{-MoS}_x/\text{WO}_3$	313
В.Г. СРЕДИН, А.П. МЕЛЕХОВ, Р.Ш. РАМАКОТИ МЕХАНИЗМ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В CdHgTe ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЯКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	315
У.С. СТАРИКОВА, Н.Н. СОБОЛЕВА, А.В. МАКАРОВ, Е.В. ХАРАНЖЕВСКИЙ ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА $\text{NiCrBSi-B}_4\text{C}$ ПОКРЫТИЯ	317
А.С. СТАРИКОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ, И.В. АНИЩЕНКО, С.В. ПОКРОВСКИЙ, Д.А. АБИН, И.А. РУДНЕВ ЛАТЕРАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕВИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СТОПКИ ВТСП-ЛЕНТ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР	319
А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, Е.А. ЛЕВАШОВ ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Ta-Si-N	321
А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, П.А. ЛОГИНОВ, В.В. КЛЕЧКОВСКАЯ, Е.А. ЛЕВАШОВ ¹ ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ Ta-Zr-Si-B-C-N ОТ РАСХОДОВ РЕАКЦИОННЫХ ГАЗОВ N_2 И C_2H_4	323
А.К. ТАШАТОВ, Н.М. МУСТАФОЕВА, Р.Р. ХУДАЯРОВ, А.Р. ТУРСУНОВ ВЛИЯНИЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ ТОНКИХ	

ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ	325
Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, М.Б. ЮСУПЖОНОВА, Д.А. МИРЗАЕВ, Ш. ХАШИМОВ_ВЛИЯНИЯ АДСОРБЦИИ АТОМОВ Ba НА СОСТАВ МОНОКРИСТАЛЛОВ CdS.....	327
Г.В. ТИХОНОВСКИЙ, А.А. ПОПОВ, Е.А. ПОПОВА-КУЗНЕЦОВА, И.Н. ЗАВЕСТОВСКАЯ, А.В. КАБАШИН_ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА САМАРИЯ 152 И ЭЛЕМЕНТНОГО ВИСМУТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БИОМЕДИЦИНЕ.....	329
А.Н. УЛУКМУРАДОВ, И.Д. ЯДГАРОВ, Д.В. АЛЯБЬЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМОВ ВОДОРОДА С ГРАНЯМИ УЕДИННЕННОГО ФУЛЛЕРЕНА	331
Б.Е. УМИРЗАКОВ, А.К. ТАШАТОВ, Н.М. МУСТАФОЕВА, ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПЛЕНOK NiSi ₂ /Si	333
Б.Е. УМИРЗАКОВ, С.Ж. НИМАТОВ, Ф.Я. ХУДАЙКУЛОВ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ Si(111) ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ.....	335
А.В. ФРОЛОВ, А.П. ОРЛОВ, А.Г. ТЕМИРЯЗЕВ ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСЛОЙНОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ И СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ АТОМНО ТОНКИХ ПЛЁНОК Bi ₂ Se ₃	337
Н.П. ЧЕРЕЗОВ, Е.В. ПЕТРОВ, В.К. ПРОКУДИНА_ПОЛУЧЕНИЕ ТИТАНОВОГО ПОРОШКА МЕТОДОМ СВС-ГИДРИРОВАНИЯ И ДЕГИДРИРОВАНИЯ В ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ.....	339

Г.Ш. ШАПИЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Д.К. ПАЛЧАЕВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, П.М. САЙПУЛАЕВ МОРФОЛОГИЯ НАНОПОРОШКОВ $Y(Fe_{1-x}Ba_x)_2Cu_3O_{7-d}$	341
П.В. ШАХОВ, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Э.Р. ТОЛОРДАВА, И.Н. САРАЕВА, А.А. РУДЕНКО, Р.А. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, С.И. КУДРЯШОВ, А.А. ИОНИН ¹ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ NiO_x МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ И ПРОВЕРКА ИХ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ.....	343
Р.М. ЭМИРОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОПОРОШКА МАГНЕТИТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ МЫШЬЯКА	345
М.О. ЭТРЕКОВА, А.В. ЛИТВИНОВ, А.А. МИХАЙЛОВ ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНЫХ МДП-СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ, ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИМЕТИЛДИСУЛЬФИДА	347
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ.....	349
М. Г. УРИН_ПАМЯТИ А. Б. МИГДАЛА	350
Н.Н. АРСЕНЬЕВ___МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГИГАНТСКОГО МОНОПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА В $^{118-132}Sn$...	351
В.И. БОНДАРЕНКО ¹⁾ , С.Ю. ИГАШОВ ²⁾ , М.Г. УРИН ³⁾ О ВКЛАДЕ ТЕНЗОРНЫХ СИЛ В ФОРМИРОВАНИЕ ГАМОВ-ТЕЛЛЕРОВСКОГО РЕЗОНАНСА И ЕГО ОБЕРТОНА В СРЕДНЕ-ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ С ЗАПОЛНЕННЫМИ ОБОЛОЧКАМИ.....	353
И.Н. БОРЗОВ, С.В. ТОЛОКОННИКОВ_САМОСОГЛАСОВАННЫЙ ПОДХОД К ИЗОБАР-АНАЛОГОВЫМ РЕЗОНАНСАМ.....	355
М. Л. ГОРЕЛИК, М. Г. УРИН_ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ 0^+ ГИГАНТСКИХ РЕЗОНАНСОВ В ИЗОТОПАХ ОЛОВА	357

А.П. СЕВЕРЮХИН <u>ШИРИНА</u> ДВОЙНОГО γ -РАСПАДА ЯДЕРНОГО СОСТОЯНИЯ 2^+	359
Д.А. ГОЖЕВ, С.Г. БОЧКАРЕВ, А.В. БРАНТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ МОЩНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ РЕКОРДНО КОРОТКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИЗ МИКРО-КЛАСТЕРНОЙ ПЛАЗМЫ.....	361
А.М. ГРУДИНИНА, И.Л. КУРБАКОВ, Ю.Е. ЛОЗОВИК, Н.С. ВОРОНОВА <u>РАВНОВЕСНАЯ</u> БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИЯ ПОЛЯРИТОНОВ С ПОВЫШЕННОЙ ЭКСИТОННОЙ ФРАКЦИЕЙ	364
Ф.А. КОРНЕЕВ, К.А. МАТВЕЕВСКИЙ, J.J. SANTOS <u>О</u> РАСПРОСТРАНЕНИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО РАЗРЯДНОГО ИМПУЛЬСА ПО ТОНКОМУ ПРОВОДНИКУ....	366
Д.И. ТЮРИН, С.В. ПОПРУЖЕНКО <u>О</u> ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ИОНИЗАЦИИ ПО ВЕЛИЧИНЕ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОГО ИМПУЛЬСА ФОТОЭЛЕКТРОНА .	368
Е.Б. КАЛЫМБЕТОВ, С.В. ПОПРУЖЕНКО <u>ИЗЛУЧЕНИЕ</u> УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ИОНИЗАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ СВЕРХСИЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЕМ	370
М.А. ПОСАЖЕНКОВ, Н.С. ВОРОНОВА <u>ВЛИЯНИЕ</u> ЛОКАЛЬНОГО ПОДОГРЕВА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ НА ДИНАМИКУ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОГО КОНДЕНСАТА	372
М.А. РАКИТИНА, А.В. БРАНТОВ <u>ИОННО-ЗВУКОВАЯ</u> НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ПЛАЗМЕ С ДВУМЯ СОРТАМИ ИОНОВ	374
С.А. СУББОТИН, Н.С. ВОРОНОВА, Ю.Е. ЛОЗОВИК ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ РЕШЕТОК ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННЫХ КОНДЕНСАТОВ	376

С.И. ГЛАЗЫРИН, К.Е. ГОРОДНИЧЕВ, П.П. ЗАХАРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МИШЕНЕЙ ЛТС ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ.....	378
С.Е. КУРАТОВ, Ю.Е.ЛОЗОВИК_МОДИФИКАЦИЯ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КЛАСТЕРАХ, ВЫЗВАННАЯ НАЛИЧИЕМ КРУПНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАСШТАБА НЕОДНОРОДНОСТИ	380
К.Е. ГОРОДНИЧЕВ, С.И. ГЛАЗЫРИН, П.П. ЗАХАРОВ, С.Е. КУРАТОВ_ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ УСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ.....	382
А.Б. КУКУШКИН, В.С. НЕВЕРОВ, Р.И. ХУСНУТДИНОВ АЛГОРИТМЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЦИКЛИНГА ВОДОРОДА К ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ ТОКАМАК	384
А.В. БЕРЕЗИН, А.А. МИРОНОВ, Е.С. СОЗИНОВ,_УРАВНЕНИЯ ДАЙСОНА-ШВИНГЕРА В СКАЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ	386
Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ, Д.Б. РОГОЗКИН_ОПТИЧЕСКИЙ АНАЛОГ ЭФФЕКТА ААРОНОВА-БОМА.....	388
РОЖДЕНИЕ ПАР ЧАСТИЦ-АНТИЧАСТИЦ ИЗ ВАКУУМА И МЕТОД МНИМОГО СОБСТВЕННОГО ВРЕМЕНИ	390
В.В. МАРИНЮК_ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ В НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ СИСТЕМЕ СИЛЬНЫХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ	392
Е.С. СОЗИНОВ, Л.В. БОРК, Н.Б. МУЖИЧКОВ,_АМПЛИТУДЫ РАССЕЙАНИЯ В ТОЧНО РЕШАЕМОЙ «ФИШНЕТ» МОДЕЛИ И D=6 ЛЕСТНИЧНЫЕ ДИАГРАММЫ	394

И.А. ВШИВЦЕВ, А.А. МИРОНОВ, Е.С. СОЗИНОВ, А.М. ФЕДОТОВ_РАСПАД НЕСТАБИЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ В МОДЕЛИ ЛИ..... 396

Секция ФИЗИКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ 398

В.А. ШАРГАТОВ_ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ «ЛИГУС» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ И ГЛОБАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЙ..... 399

Ж.А. АМИР, Ж.Б. КУДЬЯРОВА, Д.А. БАЙСЕЙТОВ, М.И. ТУЛЕПОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОГЕНЕРИРУЮЩЕГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ 401

ZH.A. AMIR, ZH.B. KUDYAROVA, D.A. BAISEITOV,_Э.К. АНДЕРЖАНОВ, С.П. МЕДВЕДЕВ, А.М. ТЕРЕЗА, С.В. ХОМИК ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛЕ С МНОГОСТУПЕНЧАТЫМ ФОКУСИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ.... 403

П.А. ВЛАСОВ, В.Н. СМИРНОВ, Н.С. МАЛЫШЕВ, Д.И. МИХАЙЛОВ, Г.Л. АГАФОНОВ, В.А. ПОЛЯНСКИЙ, И.Л. ПАНКРАТЬЕВА_ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ОКИС- ЛЕНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ ЭЛЕК- ТРИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ С ПРОВОДЯЩЕЙ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 405

Вас.С. ИВАНОВ, В.С. ИВАНОВ, С.М. ФРОЛОВ_РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЕССЕ- ТОЧНЫМ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧА- СТИЦ В ЗАДАЧАХ С ЗАДАНЫМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ 408

И.О. ШАМШИН, М.В. КАЗАЧЕНКО, С.М. ФРОЛОВ_ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СМЕСЯХ МЕТАН – ВОДОРОД – ВОЗДУХ 410

Р.И. КАНЬГИН, И.И. КАНЬГИН, Е.Е. МЕШКОВ, И.А. НОВИКОВА, Л.Л. ОГОРОДНИКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ

УСТОЙЧИВОСТИ КУПОЛА ВСПЛЫВАЮЩЕГО ПУЗЫРЯ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ АТВУДА.....	412
А.В. КАРАБУЛИН, В.И. МАТЮШЕНКО, М.Е. СТЕПАНОВ, В.И. НИКОЛАЙЧИК, И.И. ХОДОС_ОКИСЛЕНИЕ ИНДИЕВЫХ НАНОПРОВОЛОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В КАМЕРЕ ПЭМ	414
Б.Т. ЛЕСБАЕВ, Г.С. УСТАЕВА, Н.Б. РАХЫМЖАН, А. БИДИЛЬДАЕВА____СИНТЕЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ В КООКСИАЛЬНОМ ПЛАМЕНИ	416
А.Ю. МАЛАХОВ, С.А. СЕРОПЯН, И.В. САЙКОВ, И.В. ДЕНИСОВ УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ СИНТЕЗА NiAl В СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЕ	418
С.П. МЕДВЕДЕВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.Н. ИВАНЦОВ, К.И. КОВАЛЕВА, А.М. ТЕРЕЗА, С.В. ХОМИК_ВЛИЯНИЕ ФРАГМЕНТОВ МЕМБРАНЫ НА ТЕЧЕНИЕ В КОНИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ.....	420
И.Н. МЕЛЬНИКОВ, Н.В. МУРАВЬЕВ, И.В. КУЧУРОВ, В.Г. КИСЕЛЕВ, А.Н. ПИВКИНА_КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ТЕРМОЛИЗА БИЦИКЛООКТОГЕНА ПО ДАННЫМ ТЕРМОАНАЛИТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И КВАНТОВОХИМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ	422
Л.Р. ОБРУЧКОВА, В.П. ЕФРЕМОВ, А.Д. КИВЕРИН, И.С. ЯКОВЕНКО_АНАЛИЗ РОЛИ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНАЦИИ В ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ.....	424
В.А. ПУШКОВ, Ю.В. БАТЬКОВ_ИЗУЧЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.....	426
А.И. САВВАТИМСКИЙ, С.В. ОНУФРИЕВ, Г.Е. ВАЛЬЯНО ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ ГРАФИТА (ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ).....	428

В.А. СМЕТАНЮК, И.А. САДЫКОВ, А.С. СИЛАНТЬЕВ, С.М. ФРОЛОВ _____ЦИКЛИЧЕСКАЯ ГАЗОДЕТОНАЦИОННАЯ ШТАМПОВКА ПЛОСКИХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ	430
А. С. СИЛАНТЬЕВ, С. М. ФРОЛОВ, В. А. СМЕТАННЮК, И. О. ШАМШИН, В. С. АКСЁНОВ, И. А. САДЫКОВ_ГАЗИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ СИЛЬНО ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ, ПОЛУЧАЕМЫМ ДЕТОНАЦИОННЫМ СПОСОБОМ.....	432
А.М. ТЕРЕЗА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.С. БЕТЕВ, С.П. МЕДВЕДЕВ, С.В. ХОМИК, Г.Н. МОХИН ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА	434
ЩЕГОЛЬКОВА И.В., АБДУЛКАРИМОВА Р.Г., ВОНГАЙ И.М., МАКУЛБЕК Н.Т._РАСЧЕТ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ КАМЕР ВЫСО- КОГО ДАВЛЕНИЯ В ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ С МЕМБРАННОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ.....	436
Ю.А. БОГДАНОВА, С.А. ГУБИН, Д.Н. БОЯРСКИХ_ВЛИЯНИЕ СПОСОБА РАЗДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРУЕМЫХ СВОЙСТВ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ	438
Ю.А. БОГДАНОВА, В.А. ВЫСОЦКИЙ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СВОЙСТВ ПЕРЕНОСА МЕДИ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ	440
С.В. ГОРКУНОВ, В.А. ШАРГАТОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	442

Л. И. ГРИШИН, А. Ю. ДОЛГОБОРОДОВ, В. Г. КИРИЛЕНКО ИМПУЛЬСНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ НАНОТЕРМИТОВ ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ.....	444
В.Ф. ЛОМАДУРОВ, Т.В. ГУБИНА_ИССЛЕДОВАНИЕ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ НИТРАТ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ – НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ МЕТОДОМ ШИРОКОУГЛОВОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ.....	446
В.Ф. ЛОМАДУРОВ, Т.В. ГУБИНА_ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ АМОРФНОСТИ НИТРАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ	448
С.А. ГУБИН, С.Х. ЗАЙНЕТДИНОВ, С.И. СУМСКОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН С НЕСКОЛЬКИМИ ЗВУКОВЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ	450
М.Ш. КУРБАНОВ, У.М. НУРАЛИЕВ, С.А. ГУБИН, А.В. КУДИНОВ, И.В. МАКЛАШОВА_ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАНА.....	452
Н.Н. СЕРЕДКИН, К.В. ХИЩЕНКО_РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СМЕСЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ.....	454
С.А. ГУБИН, А.М. СВЕРЧКОВ, С.И. СУМСКОЙ ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОУДАРОВ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ КАВИТАЦИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ В ТРУБОПРОВОДЕ.....	456
Е. С. ГОНЧАРОВ, Г. В. КОЛОМИЙЦЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕНИЙ В ВИДЕ БЕГУЩИХ ВОЛН УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА – ДЕ ВРИЗА – БЮРГЕРСА С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИЕЙ ПОТОКА.....	458

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

А.Я. ДЗЮБЛИК

Институт Ядерных Исследований НАН Украины, Киев, Украина

ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАЗРЯДКА ЯДЕРНЫХ ИЗОМЕРОВ ЛАЗЕРАМИ

Построена квазиклассическая теория взаимодействия импульсов рентгеновских лазеров с ядрами в рамках адиабатического приближения. При этом используется формализм Самбе и других, позволяющий свести временную задачу к стационарной с квазиэнергиями и соответствующими волновыми функциями композитного гильбертова пространства. Рассмотрены как двухуровневая, так и трех-уровневая схемы.

A.YA. DZYUBLIK

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

EXCITATION AND DISCHARGE OF NUCLEAR ISOMERS BY LASERS

In the framework of quasi-classical approximation we built a theory for interaction of X-ray laser pulses with nuclei. In this way it is used the approach of Sambe et al., which allows to reduce the time-dependent task to the stationary one, dealing with quasi-energies and corresponding wave functions in the composite Hilbert space. Both two-level and three-level schemes are considered.

В большом количестве ядер имеются возбужденные долгоживущие состояния (изомеры). В частности, в ядре ^{178}Hf есть изомерный уровень 16- с энергией 2,446 МэВ и периодом полураспада 31 год. Весьма заманчиво управлять гигантской энергией изомеров с помощью внешних воздействий. В этой связи Коллинс с соавторами [1] предприняли ряд экспериментов с этим изомером $^{178\text{m2}}\text{Hf}$, облучая его рентгеновскими лучами с энергией фотонов от нуля до десятков кэВ. Они утверждали, что наблюдали ускорение распада изомера на 2 – 3 %, обусловленное тем, что ядро, поглощая фотоны с резонансной частотой, переходит в промежуточное возбужденное состояние, из которого уже разрешен распад. Однако последующие измерения, а также теория дали отрицательное заключение по поводу результатов Коллинса [1]. В связи с созданием рентгеновских лазеров на свободных электронах в последние годы ведутся теоретические исследования особенностей возбуждения ядер лазерными импульсами в рентгеновском диапазоне. Обычно это делается с помощью уравнений Блоха для матрицы плотности [2]. В нашей же работе [3] использовались волновые функции в квази-классических расчетах вероятности разрядки изомеров при переходе через

промежуточный уровень под действием рентгеновского лазера. При этом использовался формализм, развитый в работах [4,5].

Системы, гамильтониан которых периодически зависит от времени, $H(t)=H(t+T)$, описываются волновой функцией Флоке $\Psi(t)=u(t)e^{-i\mathcal{E}t/\hbar}$, где $u(t)=u(t+T)$ - периодическая функция времени и \mathcal{E} - квазиэнергия. Самбе [4] ввел композитное гильбертово пространство периодических функций $u(t)$, в котором скалярное произведение функций определяется как обычное скалярное произведение, проинтегрированное еще и по времени в пределах одного периода от $-T/2$ до $T/2$. Кроме того, вместо обычного гамильтониана H он использовал гамильтониан Флоке $H_F = H - i\hbar d/dt$. Эти новшества позволили свести временную задачу о переходах в квантовой системе, индуцированных классической электромагнитной волной, к стационарной. Обобщение такого формализма на случай лазерных импульсов было дано в статье [5] с помощью предельного перехода $T \rightarrow \infty$.

Лазерный импульс мы описываем векторным потенциалом $A(r, t)$ с огибающей, зависящей от времени, а взаимодействие ядра с такой волной в виде стандартного интеграла, в котором далее производится разложение по мультипольным операторам [3]. Рассмотрение проводится в приближении коротких импульсов по сравнению с временем жизни ядра.

Детально проанализирован индуцированный распад 6- изомера ^{84}Rb с энергией 463,59 кэВ через промежуточный 5- уровень с энергией 466,64 кэВ. Показана возможность существенного ускорения распада изомера.

Рассмотрен случай двух лазерных импульсов, взаимодействующих с ядром. Один импульс возбуждает резонансный переход в первый промежуточный уровень, из которого еще разрешен переход в изомер, а другой импульс генерирует переход на второй уровень, из которого возврат на изомерный уровень затруднен. В результате возможен эффективный разряд изомера с выходом его энергии.

Список литературы

1. Collins C.B., et al.// Phys. Rev. C 2000. Vol. 61, 054305.
2. Wense L., Bilous P.V., Seiferle B., et al.// Eur. Phys. J. 2020, Vol.56, 176-196.
3. Dzyublik A. Ya.// Письма в ЖЭТФ. 2010. Том 92, № 3, С. 152-156.
4. Sambe H.// Phys. Rev. A. 1973. Vol. 7, № 6, P. 2203-2213.
5. Дзюблик А.Я.// ТМФ. 1991. Том 87, № 1, С. 86-96.

Г.А. АГЕЕВ, П.В. БОРИСЮК

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕ- ГИРОВАННОГО КРЕМНИЙ-ОРГАНИЧЕСКОГО ЩЕЛЕВОГО ВОЛНОВОДА

Рассмотрено влияние пространственного распределения носителей заряда в кремниевой структуре щелевого волновода, заполненного электрооптическим полимером, на комплексный эффективный показатель преломления моды при напряжениях смещения от 0 до 10 В. Показано, что наряду с выбранным профилем легирования, формируемые поверхностными состояниями в зависимости от типа легирования обогащенные или обедненные слои оказывают значительное влияние на оптические свойства щелевого волновода.

G.A. AGEEV, P.V. BORISYUK

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

THE IMPACT OF CHARGE CARRIER SPATIAL DISTRIBUTION ON THE OPTICAL PROPERTIES OF DOPED SOH SLOT WAVEGUIDE

The silicon electro-optical polymer filled slot waveguide free-carrier spatial distribution impact on the mode complex effective index at bias voltages from 0 to 10 V is reported. It is shown, that the doping profile as well as formed by surface states depending on the type of doping accumulation or depletion layers have a significant effect on the optical properties of the slot waveguide.

Щелевой волновод представляет собой две шины из материала с высоким показателем преломления (в данном случае кремния), разделенные областью щели, заполненной материалом обкладки с низким показателем преломления. Особенностью данного волновода является концентрация моды оптического излучения внутри области щели, как показано на рисунке 1. Благодаря этому, щелевой волновод позволяет достичь сильного электрооптического эффекта при его заполнении органическим полимером с выраженным электрооптическим эффектом. Синтезированные в настоящее время полимеры имеют линейный электрооптический коэффициент r_{33} до 500 пм/В, что на порядок выше, чем у традиционного для оптики ниобата лития с r_{33} равным 32 пм/В. В результате, показатель преломления данного волновода изменяется в зависимости от

приложенного к нему напряжения смещения, что находит применение в различных активных элементах интегральной фотоники [1].

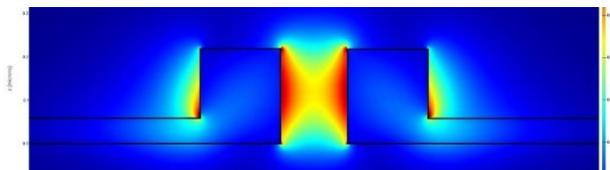


Рис. 1. Пространственное распределение напряженности электрического поля моды щелевого волновода

Для создания электрического поля в области щели к шинам волновода прикладывают напряжение смещения через легированные кремниевые полосы. Так как часть моды распространяется через кремниевые шины, то распределение носителей зарядов оказывает влияние на оптические свойства волновода. В свою очередь, распределение концентрации носителей заряда зависит от профиля легирования, приложенного напряжения смещения, а также поверхностных состояний на границе раздела кремния и его оксида. В докладе приведены расчеты и анализ электрических и оптических характеристик для легированного ионной имплантацией щелевого волновода, изготавливаемого на КНИ пластине с 220-нм приборным слоем кремния и заполненного смесью полимеров HLD1/HLD2 [2].

Изменение действительной части показателя преломления кремния вызвано эффектом дисперсии плазмы, а изменение мнимой части, характеризующей адсорбцию, обусловлено поглощением фотонов свободными носителями заряда и двухфотонным поглощением. Пространственные распределения напряженности электрического поля в окрестности волновода и концентрации носителей заряда найдены для кремния, легированного как донорной, так и акцепторной примесью 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.

Список литературы

1. Koeber S. и др. Femtojoule electro-optic modulation using a silicon–organic hybrid device // Light Sci. Appl. 2015. Т. 4. № 2. С. e255–e255.
2. Xu H. и др. Ultrahigh Electro-Optic Coefficients, High Index of Refraction, and Long-Term Stability from Diels–Alder Cross-Linkable Binary Molecular Glasses // Chem. Mater. 2020. Т. 32. № 4. С. 1408–1421

Д.В. БОРТКО, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ, Ю.Ю.
ЛЕБЕДИНСКИЙ, К.М. БАЛАХНЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЁНОК ИЗ НАНОКЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА И ЕГО ОКСИДА, ИМЕЮЩИХ СТРУКТУРУ CORE-SHELL

Были созданы тонкие плёнки на основе нанокластеров тугоплавкого металла Та методом магнетронного осаждения с последующим окислением кластеров до структуры core-shell с металлическим ядром и оболочкой из широкозонного полупроводника оксида Та. Образцы исследованы методами РФЭС и СХПЭЭ до и после окисления на атмосфере. Экспериментально определенные значения ширины запрещенной зоны таких плёнок уменьшались последовательно с увеличением размеров кластеров. Как и запрещенная зона одного кластера, полученная размерная зависимость имеет нелинейный затухающий характер [1]. Обсуждалось использование размерных эффектов кластерных плёнок для построения структуры типа сверхрешетки с целью потенциального использования в детекторах УФ одиночных фотонов.

D.V. BORTKO, P.V. BORISYUK, O.S. VASILYEV,
Y.Y. LEBEDINSKII, K.M. BALAKHNEV

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

THIN TA/TA OXIDE CORE-SHELL NANOPARTICLE FILM SIZE- DEPENDENT ENERGY STRUCTURE

A set of thin films, consisting of tightly packed monodisperse nanoparticles, or clusters, of refractory metal (Ta) was obtained by magnetron sputtering method with mass filtration. The samples were exposed to the atmosphere for oxidation and were analyzed by XPS and REELS twice: before and after the exposure, in order to reestablish a size dependency of the Ta oxide nanoparticle bandgap. It was found that the bandgap of the thin films decreased with the increase of the typical particle size. Here was concluded that the bandgap of the thin films made of monodisperse nanoparticles, as well as the one of the single nanocluster, has the size dependency and decreases non-linearly up to a saturation point with the increase in particle size, similarly to calculated results in [1]. The application of the size effects of cluster films to create super lattice structures for utilizing in UV detectors of single photons was discussed.

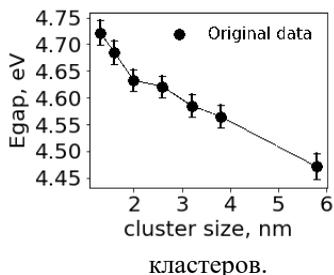
В настоящее время активно исследуются размерные свойства наночастиц, нанонитей и тонких плёнок. В частности, размерная зависимость ширины запрещенной зоны [1,2] наноразмерных объектов может быть использована при создании высокочувствительных датчиков излучения [3,4]. Однако существует

проблема прецизионного контроля размера используемых нанообъектов. Кроме того, интересен вопрос проявления размерных квантовых свойств у макроскопического материала, состоящего из наноразмерных объектов, например, нанонитей или наночастиц одного размера.

В данной работе был сформирован набор тонких «монодисперсных» плёнок, состоящих из контактирующих между собой наночастиц тугоплавкого металла (Ta) методом магнетронного распыления с последующей фильтрацией по массе.

Полученные образцы были исследованы методом РФЭС и СХПЭЭ до и после вынесения на атмосферу. Из полученных результатов был сделан вывод, что частицы тантала (Ta) окислились частично, причём образовалась core-shell структура, у которой ядро металлическое, а оболочка полупроводниковая – оксид тантала. Также была построена экспериментальная зависимость ширины запрещенной зоны от размера частиц плёнки (рис. 1), у которой прослеживается затухающий характер, предсказываемый теорией [1,5].

Рис.1. Зависимость ширины запрещённой зоны от размера её



Таким образом, было показано, что запрещенная зона у монодисперсных плёнок, состоящих из нанокластеров, также как и запрещенная зона одного кластера, имеет размерную зависимость, и с уменьшением размера частиц её значение увеличивается.

При рассмотрении системы контактирующих наночастиц, сформированных полностью из оксида Ta, и при дальнейшем масштабировании такой системы может быть получена энергетическая структура, подобная используемой в полупроводниковых сверхрешетках. Подобные структуры на сегодняшний день широко применяются в лавинных фотодетекторах для более эффективного умножения фототока [6,7]. Имея в виду результаты данной работы, край поглощения оксида Тантала лежит в области ультрафиолета (4.47-4.72 эВ). Таким образом, данные системы можно рассматривать для потенциального использования при разработке УФ фотодетектора одиночных фотонов.

Список литературы

1. A. Gajewicz, T. Puzyn, B. Rasulev, and D. Leszczynska, "Metal Oxide Nanoparticles : Size-Dependence of Quantum-Mechanical Properties," pp. 53–58, 2011.

2. D. L. Ferreira et al., "Size-dependent bandgap and particle size distribution of colloidal semiconductor nanocrystals," *J. Chem. Phys.*, vol. 147, no. 15, 2017.
3. F. Wang et al., "Preparation and photoelectric properties of SnOx films with tunable optical bandgap," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 739, no. November 2019, 2020.
4. P. V. Borisyuk, O. S. Vasilyev, Y. Y. Lebedinskii, D. V. Bortko, and K. M. Balakhnev, "Formation and properties of thin Mo and Mo oxide nanoparticle films," *Mater. Lett.*, vol. 262, p. 127044, 2020.
5. M. Singh, M. Goyal, and K. Devlal, "Size and shape effects on the band gap of semiconductor compound nanomaterials," *J. Taibah Univ. Sci.*, vol. 12, no. 4, pp. 470–475, 2018.
6. Q. Looker, B. A. Aguirre, M. E. Hoenk, A. D. Jewell, M. O. Sanchez, and B. D. Tierney, "Superlattice-enhanced silicon soft X-ray and charged particle detectors with nanosecond time response," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 916, no. September 2018, pp. 148–153, 2019.
7. A. G. U. Perera, "Heterojunction and superlattice detectors for infrared to ultraviolet," *Prog. Quantum Electron.*, vol. 48, pp. 1–56, 2016.

М.И. ВАСЬКОВСКАЯ¹, Е.А. ЦЫГАНКОВ¹, С.А. ЗИБРОВ¹, Д.С.
ЧУЧЕЛОВ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ¹, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}, В.П.
ЯКОВЛЕВ²

¹*Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),
Москва, Россия*

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

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТЫ КПП-РЕЗОНАНСА ОТ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Продемонстрирован эффект исключения линейного отклика частоты резонанса когерентного пленения населенностей (КПП) на изменения внешнего магнитного поля. Эффект реализуется при определенном значении магнитного поля, используемого в стандартах частоты на основе КПП, из-за конкуренции между затягиванием частоты соседними резонансами и квадратичным зеемановским сдвигом. Обнаружено, что процесс обладает ориентационной асимметрией и подавление возможно только при определенной комбинации поляризации оптического поля и направления магнитного поля. Следовательно, правильная конфигурация электромагнитных полей может значительно уменьшить частотные сдвиги, вызванные магнитным полем.

M.I. VASKOVSKAYA¹, E.A. TSYGANKOV¹, S.A. ZIBROV¹,
D.S. CHUCHELOV¹, V.V. VASSILIEV¹, V.L. VELICHANSKY^{1,2},
V.P. YAKOVLEV²

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

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

LIGHT POLARIZATION ASYMMETRY OF THE CPT RESONANCE FREQUENCY DEPENDENCE ON THE MAGNETIC FIELD

We report an approach allowing excluding the linear response of the coherent population trapping (CPT) resonance frequency to variations in the external magnetic field. The effect can be realized at a specific value of magnetic field used in CPT-based frequency standards due to the competition between the frequency pulling by neighboring resonances and the quadratic Zeeman shift. We have found that the process possesses an orientation asymmetry and the suppression is possible only with a certain combination of the optical field polarization and the direction of the magnetic field. A correct configuration of electromagnetic fields can significantly decrease the magnetic-induced frequency fluctuations.

Основными факторами, влияющими на характеристики стабильности микроволнового стандарта частоты на основе эффекта КПН, являются частотные сдвиги, обусловленные флуктуациями температуры и интенсивности лазерного излучения [1,2]. В случае, если это влияние подавлено, определяющим фактором становятся флуктуации магнитного поля, в котором находится резонансная атомная ячейка.

В данной работе были продемонстрированы зависимости частоты КПН-резонанса в атомах ^{87}Rb от величины магнитного поля (используемого для уменьшения влияния магнитозависимых резонансов на метрологический) для двух ортогональных циркулярных поляризаций лазерного излучения. Показано, что в одном случае при определенном значении магнитного поля V^* наблюдается линейный отклик частоты на изменения внешнего магнитного поля, а в другом - квадратичный. Величина V^* зависит только от амплитуд и ширины КПН-резонансов.

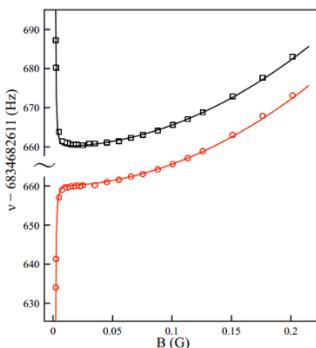


Рис. 1. Зависимость частоты КПН-резонанса от величины магнитного поля для σ^+ (черные квадраты) и σ^- (красные круги) поляризаций лазерного излучения.

Данный эффект может быть полезен для стандартов частоты, работающих в среде изменяющегося внешнего магнитного поля в условиях подавления световых и температурных сдвигов.

Список литературы

1. V. Shah et al. //Appl. Phys. Lett. 89, 151124 (2006).
2. J. Vanier et al.//J. Appl. Phys. 53, 5387–5391 (1982).

С.А. ЗИБРОВ¹, Д.С. ЧУЧЕЛОВ¹, А.Е. ДРАКИН¹, Д.А. ШИРЯЕВ², Е.А. ЦЫГАНКОВ¹, М.И. ВАСЬКОВСКАЯ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ¹, В.Л. ВЕЛИЧАНСКИЙ^{1,2}, А.П. БОГАТОВ¹

¹*Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва, Россия*

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

МОДУЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИНАМИЧЕСКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ МОД ДИОДНОГО ЛАЗЕРА С ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ

Обнаружено два пика в эффективности частотной модуляции диодного лазера с внешним резонатором (ДЛВР). Пики наблюдаются в СВЧ диапазоне модуляции тока инжекции на частотах близких к частоте межмодового интервала. Интервал между пиками растет с мощностью генерации, а в деталях зависит от расстройки частот собственной моды диодного лазера и рабочей моды внешнего резонатора. Очень близкое поведение наблюдается и для экстремумов амплитудного микроволнового шума в излучении лазера.

S.A. ZIBROV¹, D.S. CHUCHELOV¹, A.E. DRAKIN¹, D.A. SHIRYAEV², E.A. TSYGANKOV¹, M.I. VASKOVSKAYA¹, V.V. VASSILIEV¹, V.L. VELICHANSKY^{1,2}, A.P. BOGATOV¹.

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

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

MODULATION PROPERTIES OF AN EXTENDED CAVITY DIODE LASER AND DYNAMIC MODE SPLITTING

We have found two peaks in the efficiency of the FM modulation of an extended cavity diode laser (ECDL). The peaks appear in the microwave range of current modulation at frequencies close to the intermode spacing. The distance between peaks increases with laser power and depends additionally on the detuning of frequencies of the eigenmode of a DL and operating mode of the ECDL. Similar dependencies are observed for the extrema of the AM microwave noise.

Диодные лазеры широко используются в спектроскопии и метрологии, где эффективное взаимодействие с атомами или ионами часто требует многочастотного оптического поля. Задача упрощается, если один из лазеров обеспечивает полихроматическое поле, что возможно при частотной модуляции

(ЧМ) тока лазера. Эффективности этой модуляции посвящена работа. Исследовался ДЛВР, селективным элементом которого служил узкополосный интерференционный фильтр. Ток модулировался в СВЧ диапазоне на частотах близких к частоте равной или кратной частоте межмодового интервала. Эффективность ЧМ оценивалась по степени подавления несущей в модуляционном спектре, который регистрировался сканирующим интерферометром. Найдено, что эффективность ЧМ как функция частоты имеет два пика, близких к частоте межмодового интервала. Расстояние между пиками в основном определяется мощностью генерации, а в деталях – расстройкой плеч резонатора Рис.1. Такие же частотные зависимости от тока накачки (мощности) обнаружены и для максимумов АМ-шумов. Объяснение расщеплению спектра продольных мод их нелинейным взаимодействием было дано в работах [1,2], где оно проявлялось в шумовых характеристиках. Нами эффекты динамического расщепления мод обнаружены и в шумовых, и в модуляционных характеристиках. Отметим, что на частоте одной из близких мод характер модуляции ближе к АМ, на другой – к ЧМ. Эти особенности модуляционных характеристик важны для многих применений, включая атомные часы на когерентном плении населенностей. Результаты работы опубликованы в [3].

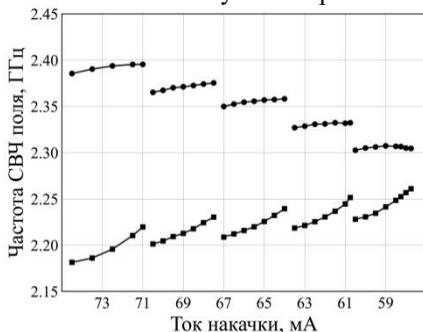


Рис. 1. Зависимость частот пиков эффективности ЧМ от тока лазера при длине резонатора 6,6 см

Список литературы

1. А.Р. Bogatov et al.//Sov. J. Quantum Electron. 13, 1221–1229 (1983).
2. А.Р. Bogatov et al.//IEEE J. Quantum Electron. QE-23, 1064–1070, (1987).
3. S.A. Zibrov et al.//IEEE J. Quantum Electron. 56, 2000607-1-7, (2020).

К.П. ГАЛСТЯН^{1,2}, Е.В. ВИЛЬШАНСКАЯ², Н.В. МОРОЗОВ^{1,2},
Б.Б. ЗЕЛЕНЕР^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

НАБЛЮДЕНИЕ И АНАЛИЗ КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТИ В СИСТЕМЕ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ-40 С ДОПЛЕРОВСКИМ УШИРЕНИЕМ

В данной работе рассматривается аналитическая интерпретация спектров когерентного пленения населенности в среде с Доплеровским уширением. Теоретическая модель применяется к случаю ионов кальция-40 и сравнивается с экспериментальными данными. Полученная модель позволит проводить неразрушающий контроль температуры для захваченных ультрахолодных ионов.

K.P. GALSTYAN^{1,2}, E.V. VILSHANSKAYA², N.V. MOROZOV^{1,2}, B.B.
ZELENER^{1,2}

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

² Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

OBSERVATION AND ANALYSIS OF COHERENT POPULATION TRAPPING IN THE CALCIUM-40 ION SYSTEM WITH DOPPLER BROADENING

In this paper, we consider the analytical interpretation of the spectra of coherent population trapping in a medium with Doppler broadening. The theoretical model is applied to the case of calcium-40 ions and compared with experimental data. The resulting model will allow for non-destructive temperature control for trapped ultracold ions.

Оптические уравнения Блоха [1] описывают поведение системы, возбуждаемой двумя лазерами, например, в щелочноземельных ионах. Мы рассматриваем восьмиуровневую Λ -систему иона кальция-40 с учетом сверхтонких подуровней (Рис. 1).

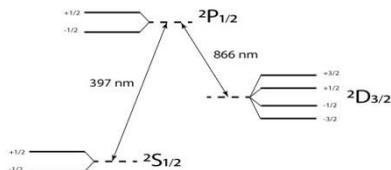


Рис. 1. Энергетические уровни иона кальция-40

Для моделирования рассматриваемой системы необходимо решить оптические уравнения Блоха, которые имеют следующий вид:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] + L(\rho), \quad (1)$$

где ρ – матрица плотности, H – гамильтониан системы, $L(\rho)$ – оператор декогеренции (спонтанного распада) [2]:

$$L(\rho) = -\frac{1}{2} \sum_n \left[C_n^\dagger C_n \rho + \rho C_n^\dagger C_n - 2C_n \rho C_n^\dagger \right], \quad (2)$$

здесь $C_n = \sqrt{\gamma_n} A_n$, γ_n – ширина соответствующего перехода, а A_n – оператор перехода. Результаты решения уравнения (1) следует усреднить по распределению атомов по скоростям:

$$\rho_{ij}(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{ij}(\delta, u) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{u_{th}} \exp\left(-\frac{u^2}{u_{th}^2}\right) du, \quad (3)$$

где δ – отстройка лазера от резонанса, u – скорость атома, $u_{th} = \sqrt{2k_B T/m}$ – наиболее вероятная тепловая скорость атомов.

Полученные экспериментальные спектры когерентного пленения населенности в ультрахолодных ионах кальция-40 рассчитаны с помощью представленной модели (Рис. 2), откуда можно определить их температуру.

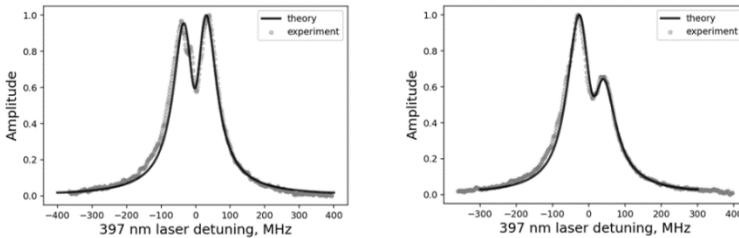


Рис. 2. Спектры флуоресценции ионов кальция-40

Данный подход позволит проводить неразрушающий и прецизионный контроль температуры в экспериментах с захваченными ионами.

Список литературы

1. Cohen-Tannoudji C., Dupont-Roc J., Grynberg G. Atom-photon interactions: basic processes and applications. – 1998. – С. 678.
2. Lindblad G. On the generators of quantum dynamical semigroups //Communications in Mathematical Physics. – 1976. – Т. 48. – №. 2. – С. 119-130.

А.И. МАГУНОВ^{1,2}, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ^{2,3}

¹*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия*
²*Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений,
Менделеево, Московская область, Россия*

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

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКИ СВЕРХТОНКИХ ПОДУРОВНЕЙ АТОМОВ РУБИДИЯ-87 И ЦЕЗИЯ -133

На основе уравнений для матрицы плотности проведен анализ эволюции населенностей магнитных подуровней атомов рубидия (изотоп 87) и цезия (изотоп 133) в резонансных лазерных полях с линейной поляризацией. Получены аналитический выражения для стационарных населенностей в результате лазерно-индуцированных оптических переходов на компонентах сверхтонкой структуры «часовых переходов» в зависимости от начальных значений заселенностей.

A.I. MAGUNOV^{1,2}, V.G. PALCHIKOV^{2,3}

¹*General Physics Institute, A.M. Prokhorov RAS, Moscow, Russia*

²*National Research Institute for Physical- Technical and Radio-Technical Measurements,
Mendeleev, Moscow region, Russia*

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

ON THE EFFICIENCY OF LASER PUMPING HYPERFINE SUBLEVELS OF ATOMS RUBIDIUM-87 AND CESIUM -133

Based on the equations for the density matrix, the evolution of the populations of the magnetic sublevels of rubidium (87 isotope) and cesium (133 isotope) atoms in resonant laser fields with linear polarization is analyzed. Analytical expressions are obtained for stationary populations as a result of laser-induced optical transitions on the components of the hyperfine structure of "clock transitions" depending on the initial values of the populations.

Создание квантового атомного ансамбля в поляризованном состоянии является актуальной задачей для многих разделов атомной и ядерной физики, например, для исследований когерентных процессов в атомных столкновениях [1], для прецизионной атомной спектроскопии [2], и т.д. Особый интерес представляет применение методов оптической накачки подуровней сверхтонкой структуры основных состояний в цезиевых и рубидиевых стандартах частоты фонтанного типа. За счет минимизации эффекта доплеровского сдвига, точность и стабильность независимого воспроизведения единиц времени и частоты в атомных фонтанах как минимум на порядок выше в сравнении со стандартами

на тепловых атомах цезия и в настоящее время составляет несколько единиц шестнадцатого знака [3].

Следует отметить, что высокая величина отношения сигнал/шум в регистрируемой системе стандарта частоты достигается либо достаточной длительностью непрерывных измерений (в ряде случаев достигающей нескольких месяцев), либо путем повышения плотности атомного пучка. В случае цезиевого фонтана повышение плотности пучка наталкивается на ряд дополнительных ограничений из-за возрастания роли спин-обменных эффектов, влияние которых становится заметным при больших плотностях пучка. При этом для рубидиевого фонтана, рассматриваемого в качестве альтернативного стандарта частоты (или хранителя частоты), ограничения по спин-обменному сдвигу частоты являются менее жесткими. В связи с этим возрастает важность оптимизации начальной относительной населенности уровней «часового перехода». Как было продемонстрировано в нашей предыдущей работе [4], решение этой задачи возможно за счет применения селективной лазерной накачки магнитных подуровней сверхтонкой структуры атомов.

В настоящей работе проведен детальный анализ эффективности оптической накачки для компонент сверхтонкой структуры основных состояний атомов рубидия и цезия при последовательном воздействии линейно поляризованных лазерных полей на резонансных переходах в открытой трехуровневой системе. Получены аналитические оценки значения заселенностей магнитных подуровней, не зависящих от лазерных параметров. В работе также продемонстрированы возможности повышения эффективности лазерной селективной накачки (в несколько раз) при последовательном и одновременном воздействии источников лазерных полей с различными типами поляризации излучения

Список литературы

1. Kleinproppen H. // Adv. Atom. Mol. Phys. 1979. Vol.15, P.423-452.
2. Мандель Л., Вольф Э.// Оптическая когерентность и квантовая система, Физматлит, 2000.
3. Павленко К.Ю., Павленко Ю.К., Беляев А.А., Блинов И.Ю. Хромов М.Н., Биз С., Лорини Л. // Квантовая Электроника, 2018, том 48, № 10, с. 967-972.
4. Магунов А.И., Пальчиков В.Г.// 2014 ЖЭТФ, Т.145. С.787-801.

С.М. ИГНАТОВИЧ¹, М.Н. СКВОРЦОВ¹, В.И. ВИШНЯКОВ¹,
Н.Л. КВАШНИН¹, В.А. ВАСИЛЬЕВ¹, Д.В. БРАЖНИКОВ^{1,2},
В.И. ЮДИН^{1,2,3}, А.В. ТАЙЧЕНАЧЕВ^{1,2}, С.Н. БАГАЕВ^{1,2},
И.Ю. БЛИНОВ⁴, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ^{4,5}, Ю.С. САМОХВАЛОВ⁴, Д.А.
ПАРЁХИН⁴, Е.А. ЗОТОВ⁴, М.П. МАЛАХ⁴, Ф.Р. СМИРНОВ⁴

¹ *Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

³ *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

⁴ *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская область, Россия*

⁵ *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ И БОРТОВЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СВЕРХМИНИАТЮРНОГО КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ

Рассмотрены результаты метрологических испытаний разработанного сверхминиатюрного стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей, который является первым реализованным стандартом подобного типа в России. Данные испытаний были получены как в лабораторных условиях, так и на основе использования автомобиля и вертолета

S.M. IGNATOVICH¹, M.N. SKVORTSOV¹, V.I. VISHNYAKOV¹,
N.L. KVASHNIN¹, V.A. VASILIEV¹, D.V. BRAZHNIKOV^{1,2},
V.I. YUDIN^{1,2,3}, A.V. TAICHENACHEV^{1,2}, S.N. BAGAEV^{1,2},
I.YU. BLINOV⁴, V.G. PALCHIKOV^{4,5}, YU.S. SAMOKHVALOV⁴, D.A.
PARYOKHIN⁴, E.A. ZOTOV⁴, M.P. MALAKH⁴,
F.R. SMIRNOV⁴

¹ *Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

² *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

³ *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

⁴ *National Research Institute for Physical- Technical and Radio-Technical Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia*

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

THE RESULTS OF GROUND AND ON-BOARD METROLOGICAL TESTS OF THE ULTRA MINIATURE QUANTUM FREQUENCY STANDARD

The results of metrological tests of the developed subminiature frequency standard based on the effect of coherent population trapping, which is the first implemented standard of this type in Russia, are considered. The test data was obtained both in laboratory conditions and through the use of a car and a helicopter.

Разработка сверхминиатюрных высокостабильных квантовых стандартов частоты позволяет решать актуальные вопросы эффективного применения данных стандартов в спутниковых и инерциальных системах навигации, а также в системах связи. Использование эффекта когерентного пленения населенностей позволяет существенно уменьшить габариты всего стандарта при сохранении высоких метрологических характеристик, поскольку отпадает необходимость в использовании СВЧ резонатора [1]

В настоящей работе выполнен цикл метрологических испытаний для разработанного сверхминиатюрного стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей, Результаты исследований, представленные в виде протоколов установленного образца, были получены как в лабораторных условиях, так и на основе использования автомобиля и вертолета.

Основными целями и задачами испытаний являлись следующие:

- оценка соответствия опытного образца требованиям, указанным в техническом задании на ОКР (кратковременная и долговременная нестабильность, потребляемая мощность, масса, габариты и т.д.);
- проверка на отсутствие резонансных частот конструкции на вибродинамическом стенде и в условиях летных и дорожных испытаний;
- проверка в климатической камере на устойчивость опытного образца к воздействию предельных повышенной и пониженной температур;
- проверка устойчивости к воздействию пониженного атмосферного давления;
- проверка прочности к воздействиям механических ударов многократного действия и т.д.

В соответствии с техническим заданием была разработана программа и методика предварительных испытаний миниатюрного квантового стандарта частоты. Общее количество испытаний – 25.

Список литературы

1. М. Н. Скворцов, С. М. Игнатович, В. И. Вишняков, Н. Л. Квашин, И. С. Месенцова, Д. В. Бражников, В. А. Васильев, А. В. Тайченачев, В. И. Юдин, С. Н. Багаев, И. Ю. Блинов, В. Г. Пальчиков, Ю. С. Самохвалов, Д. А. Парёхин.// Квантовая электроника.- 2020. –Т. 50.С. 576–580

Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А.МИШИН, Д.О.ТРЕГУБОВ, Е.С.
ФЕДОРОВА, А.А.ГОЛОВИЗИН, В.Н.СОРОКИН, К.Ю.ХАБАРОВА,
Н.Н.КОЛАЧЕВСКИЙ

*Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской Академии Наук, Москва, Россия
Российский квантовый центр, Сколково, Россия*

ПОДГОТОВКА К РЕАЛИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ ТУЛИЯ НА СПЕКТРАЛЬНО УЗКОМ ПЕРЕХОДЕ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 506 НМ

В работе проводятся подготовительные работы для создания дополнительной стадии охлаждения атомов тулия. Проведен расчет необходимых параметров для лазерного охлаждения, стабилизирована частота лазера с использованием трансфер-резонатора.

D.I.PROVORCHENKO, D.A.MISHIN, D.O.TREGUBOV,
E.S.FEDOROVA, A.A.GOLOVIZIN, V.N.SOROKIN,
K.YU.KHABAROVA, N.N.KOLACHEVSKY

*Lebedev Physical Institute of RAS
Russian Quantum Center*

TOWARDS THIRD STAGE COOLING OF THULIUM ATOMS ON NARROW TRANSITION AT A WAVELENGTH OF 506 NM

In this work we carried out the preparation for building a new cooling stage using the narrow transition at a wavelength of 506.2 nm. For this we numerically found optimal parameters of laser cooling, built up the laser system with transfer-cavity to stabilize the frequency of a target laser.

Оптические часы за последнее время значительно превзошли по своим характеристикам устройства, работающие в радиочастотном диапазоне. Это дает возможность использовать их в широком круге 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 γ

Для построения оптических часов необходимо подавить либо охарактеризовать сдвиги и уширения частоты различной природы. Ранее, нашей группой был выполнен захват атомов тулия в оптическую решетку вблизи магической длины волны [2], что позволило избежать сдвига частоты, возникающего из-за электро-дипольной поляризуемости и разработана процедура опроса атомов, позволяющая компенсировать квадратичный эффект

Зеемана [2]. Следующим шагом является исследование сдвигов, вызываемых мультипольными поляризуемостями и гиперполяризуемостью. Вызываемые ими сдвиги зависят не только от интенсивности излучения оптической решетки, но и от заселенности колебательных состояний атомов в оптической решетке, то есть от их температуры. Для их исследования необходимо охлаждение атомов до основного колебательного состояния. Для потенциала оптической решетки, используемой в нашей экспериментальной установке, требуемая температура составляет единицы мКК.

Для охлаждения атомов в нашем эксперименте используются два охлаждающих перехода с естественными ширинами 10 МГц и 350 кГц. Минимальная температура облака атомов непосредственно перед захватом в оптическую решетку в наших экспериментах составила $T = 10$ мКК [1]. Для достижения нужной температуры было решено создать дополнительную ступень охлаждения на спектрально-узком переходе. Для его реализации был выбран переход на длине волны $\lambda=506.2$ нм с естественной шириной линии $\gamma = 7.8$ кГц. В данной работе решаются подготовительные задачи для реализации третьей стадии лазерного охлаждения атомов тулия, такие как первичный расчет оптимальных параметров для охлаждения и стабилизация частоты лазера, который будет использован как источник излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-72-00174.

Список литературы

1. A.Golovizin, E.Fedorova, D.Tregubov, D.Sukachev, K.Khabarova, V.Sorokin and N.Kolachevsky //Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift. // Nature communications 10(1): 1724
2. Golovizin, A., D. Tregubov, E. Fedorova, D. Mishin, D. Provorchenko, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky. "Extraordinary low systematic frequency shifts in bi-colour thulium optical clock." arXiv preprint arXiv:2102.07468 (2021).

Д.В. СУТЫРИН, А.В. СЕМЕНКО, Г.С. БЕЛОТЕЛОВ, С.Н. СЛЮСАРЕВ
ФГУП ВНИИФТРИ, рабочий поселок Менделеево, Россия

КОМПЛЕКС МИКРОГРАВИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ КВАНТОВЫХ СЕНСОРОВ НА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМАХ

В работе представлен обзор современных комплексов для испытаний квантовых устройств на ультрахолодных атомах в условиях микрогравитации. Предложен новый вариант конструкции комплекса, который подходит также для испытаний оптических стандартов частоты на ультрахолодных атомах. Представлены основные параметры новой конструкции.

D.V. SUTYRIN, A.V. SEMENKO, G.S. BELOTELOV, S.N. SLYUSAREV
VNIIFTRI, Mendeleevo, Russia

MICROGRAVITY TEST FACILITY FOR QUANTUM SENSORS ON ULTRACOLD ATOMS

The paper presents a review of modern microgravity test facilities for testing quantum devices on ultracold atoms. A new design option for the test facility, which is also suitable for testing of optical frequency standards on ultracold atoms, is proposed. The main parameters of the new design are presented.

Гравитационное поле Земли является важной областью исследования. Различные Проведенные спутниковые гравиметрические миссии [1-2] произвели революцию в наших знаниях о гравитационном поле поверхности Земли и в нашем понимании процессов перераспределения и переноса массы в глобальном масштабе. Различные платформы, как в космосе, так и на земле, обеспечивают состояние свободного падения, при котором ультрахолодные атомы в условиях отсутствия гравитации или микрогравитации могут существовать от пяти до десяти секунд (спутники, метеорологические ракеты, Международная Космическая Станция (МКС), полеты по параболической траектории и башни свободного падения (БСП)). Сейчас уже проводятся первые эксперименты, использующие ультра-холодные атомы в космосе, (MAIUS [3], CAL [4], BECCAL, SAI, iSense [5], и др.)

По сравнению с башней свободного падения, космическая станция или спутник предлагает практически неограниченную продолжительность эксперимента, но стоимость проведения эксперимента на такой платформе очень высока. Также, сложно провести какие-либо изменения в эксперименте, поэтому в космос должны отправляться уже доведенные до совершенного уровня технологии. Исключением может быть МКС, на которой можно вносить

изменения в эксперимент, при наличии квалифицированного персонала. Существуют альтернативы спутникам в виде различных видов полетов: метеорологическая ракета, падение с воздушного шара (с приземлением на парашюте) и параболический полет на специальном самолете. Эти методы предлагают длительность гравитации на протяжении нескольких минут за умеренную стоимость, но качество уровня микрогравитации в них снижается.

В мире существует несколько БСП. ZARM обеспечивает время свободного падения 9,3 с [6], NASA Glenn 2.2 Second Drop Tower [7] - 2,2 с. Лифт Эйнштейна [8] позволяет производить около 100 запусков в сутки. Новой альтернативой БСП может являться спуск исследуемой установки с возвышенности. В таком варианте микрогравитация достигается за счет свободного падения тела, брошенного с высоты под нулевым углом к горизонту по траектории, являющейся ветвью параболы. В данной работе мы рассматриваем основные параметры и особенности такого комплекса.

Список литературы

1. Drinkwater, M. R., Floberghagen, R., Haagmans and others // Space Science Reviews, 108(1-2), 419-432
2. Johannessen, J. A., Balmino, G., Le Provost and others // Surveys in Geophysics, 24(4), 339-386.
3. Stammerger, A., Ettl, J., Grosse, J., Hörschgen-Eggers and others // ESA Special Publication. (pp. 183-190)
4. Elliott, E. R., Krutzik, M. C., Williams, J. R., Thompson, R. J., & Aveline, D. C. // NASA's CAL: system development and ground test status. npj Microgravity, 4(1), 16.
5. Bongs, K., Malcolm, J., Ramelloo and others // In Quantum Information and Measurement (pp. QTu3B-1)
6. Von Kampen, P., Kaczmarczik, U., & Rath, H. J. // The new drop tower catapult system. Acta Astronautica, 59(1-5), 278-283.
7. Neumann E (2008) 2.2 second drop tower at NASA Glenn Research Center.
8. Kulas, S., Vogt, C., Resch, A., Hartwig, J. and others // Microgravity Science and Technology, 29(1-2), 37-48

В. Н. СМІРНОВ, И. А. СЕМЕРИКОВ, И. В. ЗАЛИВАКО, А. С.
БОРИСЕНКО, М. Д. АКСЕНОВ, П. А. ВИШНЯКОВ, П. Л. СИДОРОВ,
Н. В. СЕМЕНИН, И. А. ЖУРАВЛЕВ, К. Ю. ХАБАРОВА, Н. Н.
КОЛАЧЕВСКИЙ

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

КВАНТОВЫЕ ОПЕРАЦИИ НА СВЕРХТОНКОЙ СТРУКТУРЕ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ ИОНА ИТТЕРБИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРУПОЛЬНОГО ПЕРЕХОДА

Проведены расчёты требований к стабильности лазерного излучения для реализации однокубитных операций на сверхтонкой структуре основного состояния иона иттербия. Спроектирована система стабилизации частоты лазерного излучения на длине волны 435 нм, позволяющая получить ширину спектра излучения на уровне 100 Гц и дрейф порядка 1 Гц/с. Экспериментально исследована точка нулевого теплового расширения материала оптического резонатора.

V. N. SMIRNOV, I. A. SEMERIKOV, I. V. ZALIVAKO, A. S.
BORISENKO, M. D. AKSENOV, P. A. VISHNYAKOV, P. L. SIDOROV,
N. V. SEMENIN, I. A. ZHURAVLEV, K. YU. KHABAROVA, N. N.
KOLACHEVSKY

P. N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

QUANTUM OPERATIONS ON GROUND STATE HYPERFINE STRUCTURE OF YTTERBIUM ION WITH USAGE OF QUADRUPOLE TRANSITION

To implement a single-qubit quantum operation laser instability should meet certain requirements. In this work necessary calculations are carried out. We propose design of the stabilization system at 435 nm, which makes it possible to obtain laser's spectral width of 100 Hz and a drift of order of 1 Hz/s. We experimentally investigate the zero point of thermal expansion of the cavity material.

Квантовые вычисления являются одной из наиболее актуальных и быстроразвивающихся тематик в современной физике. Существует ряд задач, которые решаются при помощи квантового компьютера эффективнее, чем на классической машине Тьюринга. Среди возможных платформ для реализации кубита сверхтонкая структура ионов занимает лидирующее место. В 2020 году на квантовом компьютере из 32 ионов иттербия был продемонстрирован квантовый объём в 4.000.000, в то время как на других платформах он не превосходит 200. Помимо этого, кубит на сверхтонком расщеплении обладает

максимальным временем когерентности до 1 часа, что многократно превосходит время проведения квантовых операций.

Адресация такого кубита производится в оптической области с использованием стимулированного рамановского перехода. В случае использования иона иттербия возможны два варианта, а именно дипольно-разрешенный $2S_{1/2} \rightarrow 2P_{3/2}$ переход на длине волны 369 нм естественной шириной 20 МГц и квадрупольный $2S_{1/2} \rightarrow 2D_{5/2}$ переход на длине волны 435 нм с естественной шириной 3 Гц. С экспериментальной точки зрения последний является более выгодным, поскольку происходит меньшая деградация оптических элементов вследствие взаимодействия с высокоэнергетичным ультрафиолетовым излучением.

При увеличении отстройки от частоты выбранного перехода, снижается частота Раби стимулированного рамановского перехода. Для компенсации этого процесса и поддержания прежней скорости квантовой операции необходимо увеличивать мощность излучения. В то же время достоверность операции возрастает, поскольку снижается вероятность спонтанного рассеяния. Для заданного времени проведения операции в 50 мс и достоверности 0.999 оптимальная отстройка частоты лазерного излучения от перехода $2S_{1/2} \rightarrow 2D_{5/2}$ составляет 100 кГц. Для достижения такой достоверности отношение флуктуаций частоты излучения к величине отстройки должны составлять порядка 10^{-3} , что дает нам допустимое значение нестабильности лазера 100 Гц.

В работе описана система стабилизации лазерного излучения, позволяющая получить необходимые выходные параметры. Ее главным элементом является интерферометр Фабри-Перо, выполненный из ULE стекла. Была экспериментально найдена точка нулевого температурного расширения материала, после чего система была охарактеризована.

П.В. БОРИСЮК, Е.Ю. ТЕЛЬНОВ, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.О.
ТРЕГУБОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТР ИОНОВ ТОРИЯ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Получены времяпролетные спектры ионов Тория в квадрупольной ловушке Пауля линейной конфигурации в зависимости от различных параметров потенциалов на электродах ловушки и кольцах.

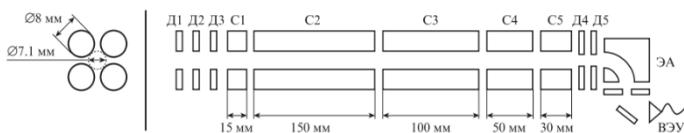
BORISYUK P. V., TELNOV E. YU, PROVINCENCE D.I, TREGUBOV D.
O.

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

TIME-FLIGHT SPECTRUM OF THORIUM IONS IN A QUADRUPOLE PAUL TRAP OF LINEAR CONFIGURATION

The time-of-flight spectra of Thorium ions in a quadrupole Paul trap of linear configuration are obtained, depending on various parameters of potentials at the trap electrodes and rings.

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.

Основная проблема, которой было посвящено данное исследование - определить распределение зарядностей ионов тория по энергиям после абляции. Для ее получения был выполнен следующий эксперимент: при изменении времени поднятия первого кольца из всего потока ионов улавливались и удерживались в ловушке только те, которые геометрически оказывались в зоне между кольцами. Таким образом, более высокоэнергичные ионы уже покинули зону удержания, а менее энергичные блокируются потенциалом кольца и не попадают в зону удержания. Количество улавливаемых ионов измерялось с помощью ВЭУ. Таким образом, было получено распределение ионов по энергиям. В зависимости от параметров потенциалов были получены характерные изменения времяпродетного спектра, а также замечены минимумы и максимумы улавливания в зависимости от параметров потенциалов, которые, предположительно, обуславливаются секулярными колебаниями.

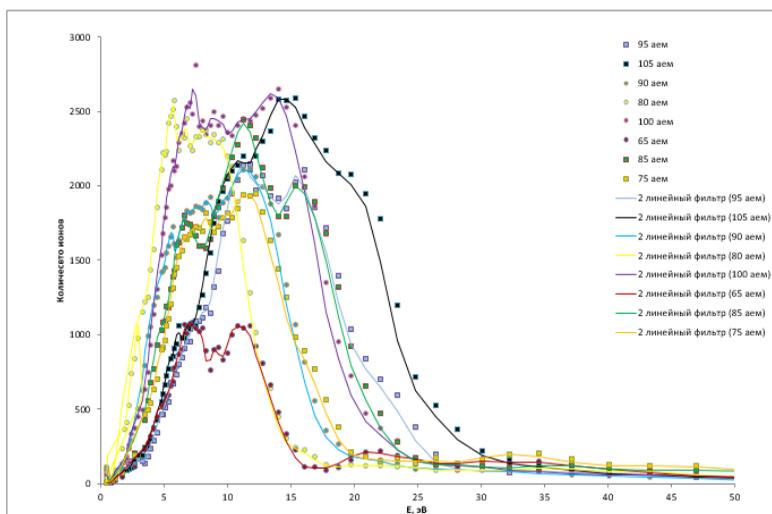


Рис. 1 Распределение ионов по энергиям в зависимости от а.е.м.

На Рис. 1 продемонстрирована зависимость количества пойманных ионов от энергии, а также структура максимумов и минимумов. Энергии, на которых наблюдаются максимумы количества пойманных ионов, кратны ~ 5 эВ и не зависят от а.е.м. (от амплитуды переменного потенциала на электродах). Данная структура обусловлена секулярными колебаниями. Первый максимум наблюдается при энергии ~ 5 эВ, что соответствует характерным временам пролета 132 мкс; второй максимум соответствует энергии ~ 10 эВ с характерным временем пролета 102 мкс; третий максимум - ~ 15 эВ с временем пролета 85 мкс; четвертый максимум - ~ 20 эВ с временем пролета 72 мкс. При увеличении а.е.м.

наблюдалось расширение структуры в область высокой энергии, что обуславливается ростом псевдопотенциала.

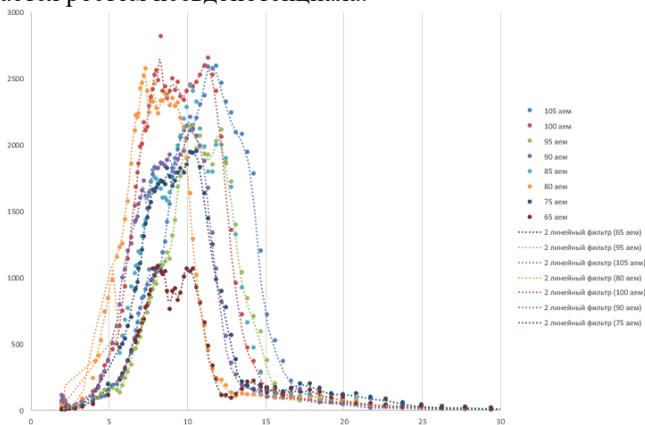


Рис. 2 Распределение ионов по частотам в зависимости от а.е.м.

На Рис. 2 продемонстрирована зависимость количества ионов от частоты, а также структура максимумов и минимумов. Первый минимум наблюдается на частоте 7 кГц, второй максимум на частоте – 9 кГц, третий максимум на частоте – 11 кГц, четвертый максимум наблюдается на частоте – 13 кГц. Эти частоты соответствуют секулярным частотам. Ионы, обладающие частотами близким к секулярным, попадают в кольца, в следствии чего наблюдается падение количества пойманных ионов.

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

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

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

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ АТОМОВ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

Предлагается проведение эксперимента по исследованию уширения часового перехода 1.14 мкм в атомах тулия, имплантированных в кристаллическую решётку благородных газов, например, аргона или неона. Имеющийся в лаборатории спектрально узкий лазер для возбуждения часового перехода в атомах тулия будет применён для прецизионной спектроскопии перехода атомов тулия в кристалле.

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

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

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

DEVELOPING EXPERIMENTAL SETUP FOR SPECTROSCOPY OF THULIUM ATOMS IN NOBLE GAS CRYSTAL

We suggest an experiment to determine 1.14 μm clock line broadening in thulium atoms implanted in a noble gas crystal, argon or neon. We have spectrally narrow clock laser which was used to excite clock transition in thulium atoms. We plan to use it to perform precision spectroscopy of the 1.14 μm line in noble gas crystal experiment.

Успешные эксперименты по лазерному охлаждению и их применение в метрологии положили начало многочисленным экспериментам по исследованию и созданию оптических часов на основе нейтральных атомов или ионов [1]. Одним из примеров таких экспериментов являются тулиевые оптические часы. В процессе исследований часового перехода 1.14 мкм было обнаружено, что он обладает аномально низкой чувствительностью к эффекту Штарка по сравнению с переходами в других нейтральных атомах [2]. Этот результат подтверждается и серией экспериментов по спектроскопии атомов тулия в матрицах благородных газов [3,4], в которых несмотря на кристаллическую решётку ширина часового перехода составляла менее разрешения спектрометра ~ 0.2 нм.

Для исследования часового перехода мы планируем применять отработанные нами методы спектроскопии атомного облака, при которой вероятность возбуждения определяется из населённости основного состояния, а не по спектру люминесценции на длине волны 1.14 мкм, как это делалось в работах [3,4].

В нашей лаборатории имеется всё необходимое оборудование для прецизионной спектроскопии часового перехода в атомах тулия. В дополнение к этому создание установки для имплантации атомов тулия в кристаллическую решётку благородных газов поможет не только определить с лучшей точностью величину уширения перехода 1.14 мкм и параметры возможного расщепления, но и сравнить его с несмещённой частотой перехода в оптических часах.

Слабое уширение перехода 1.14 мкм в кристалле благородных газов мотивирует использование тулия в качестве твердотельного излучателя с узкой спектральной шириной линии излучения, но конкретные характеристики перехода всё ещё требуют уточнения.

Список литературы

1. Ludlow, A. D., Boyd, M. M., Ye, J., Peik, E. & Schmidt, P. O. Optical atomic clocks. *Rev. Mod. Phys.* 87, 637–665 (2015).
2. Golovizin, A. et al. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift. *Nat. Commun.* 10, 1–8 (2018).
3. Gaire, V., Raman, C. S. & Parker, C. V. Subnanometer optical linewidth of thulium atoms in rare-gas crystals. *APS* 99, (2019).
4. Ishikawa, K. et al. Laser spectroscopy of thulium atoms implanted in liquid and solid ^4He . (1997).

Э. О. ЧИГЛИНЦЕВ, К. С. КУДЕЯРОВ, Н. О. ЖАДНОВ, Д. С.
КРЮЧКОВ, Г. А. ВИШНЯКОВА, К. Ю. ХАБАРОВА, Н. Н.
КОЛАЧЕВСКИЙ

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
Российский квантовый центр*

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ПО КРЕМНИЕВЫМ РЕЗОНАТОРАМ С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЗЕРКАЛАМИ GaAs/AlGaAs

Рассматривается разработка высокостабильных лазерных систем с относительной нестабильностью частоты порядка 10^{-16} . Стабилизация частоты осуществляется по высокособотным кремниевым резонаторам Фабри-Перо. Использование зеркал с кристаллическим покрытием GaAs/AlGaAs позволяет понизить уровень тепловых шумов, ограничивающих стабильность частоты. Для охлаждения резонатора до температуры нулевого теплового расширения собран вакуумный криостат. Проведены исследования резкости и двулучепреломления кристаллических зеркал. Реализована стабилизация частоты лазера к моде резонатора.

E.O. CHIGLINTSEV, K. S. KUDEYAROV, N. O. ZHADNOV, D. S.
KRYUCHKOV, G. A. VISHNYAKOVA, K. YU. KHABAROVA, N. N.
KOLACHEVSKY

*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Russian Quantum Centre
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia*

LASER STABILIZATION BASED ON CAVITY MADE OF SILICON WITH CRYSTALLINE COATINGS GAAS/ALGAAS

We consider the creation of lasers with fractional frequency instability of 10^{-16} implemented by high-quality Fabry-Perot cavities. Crystalline coatings GaAs/AlGaAs reduce the thermal noise limit of cavity stability. Vacuum cryostat was assembled for cooling down the cavity for the thermal expansion coefficient to be zero. We have studied finesse and birefringence of crystalline coatings. Laser was locked to a cavity mode.

Ультростабильные лазерные системы находят широкое применение в различных фундаментальных и прикладных областях: детектирование гравитационных волн [1], поиск темной материи [2], дрейф фундаментальных мировых констант, передача высокостабильных сигналов частоты и времени [3]. Высокостабильные лазеры являются ключевым компонентом оптических часов

— современных стандартов частоты. На времени усреднения около 1 часа нестабильность оптических часов достигает значения 6×10^{-19} [4], что открывает перспективы для использования оптических стандартов в качестве сенсоров, например, в составлении карты геопотенциала Земли [5].

Для создания атомных часов с относительной нестабильностью 10^{-19} требуется лазерный источник с нестабильностью частоты на уровне 10^{-16} . Частота лазера стабилизируется к пику пропускания высокодобротного резонатора Фабри-Перо методом Паунда-Драйвера-Холла [6]. В таком случае нестабильность частоты лазера определяется флуктуациями расстояния между зеркалами резонатора. Стабилизация длины резонатора требует температурной стабилизации и изоляции от вибраций. Фундаментальное ограничение на стабильность частоты накладывают тепловые шумы составных элементов резонатора: тела, подложек и отражающих покрытий зеркал резонатора. Перспективным материалом для изготовления резонаторов с низким уровнем тепловых шумов является монокристаллический кремний, прозрачный для излучения с длиной волны 1500 нм. Также снизить тепловые шумы позволяет использование зеркал с кристаллическими покрытиями из GaAs/AlGaAs, имеющих большую механическую добротность по сравнению с диэлектрическими покрытиями SiO₂/Ta₂O₅.

В ходе исследований был разработан и собран вакуумный азотный криостат для охлаждения кремниевого резонатора с кристаллическими зеркалами до температуры 124 К, при которой коэффициент теплового расширения кремния обращается в ноль. Была исследована резкость резонатора на длине волны 1550 нм, в широком диапазоне температур составившая около 200 000. Было обнаружено, что кристаллические зеркала являются двулучепреломляющими, из-за чего резонатор имеет две TEM₀₀ моды для различных поляризаций излучения на расстоянии около 150 кГц друг от друга. Осуществлена стабилизация частоты волоконного лазера по одной из мод резонатора методом Паунда-Драйвера-Холла. В данный момент ведутся работы по сборке идентичной системы для сличения и определения нестабильности частоты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-32-90044

Список литературы

1. Kwee P., Bogan C., Danzmann K., et al. // Opt. Express. 2012 V. 20 №10. P. 10617
2. Derevianko A. // Phys. Rev. A. 2018 V. 97 №4. P. 42506
3. Droste S., Udem T., Holzwarth R., Hänsch T. W. // Comptes Rendus Phys. 2015 V. 16 №5. P.524–530.
4. Oelker E., Hutson R.B., Kennedy C.J., et al. // Nat. Photonics. 2019
5. C. Lisdat, G. Grosche, N. Quintin et al. // Nat. Commun., vol. 7, p. 12443, Aug. 2016.
6. Drever W. P., Hall J. L., Kowalski F. V., et al. Appl. Phys. B, 31(2), 97–105 (1983)

К.С. КУДЕЯРОВ, Г.А. ВИШНЯКОВА, Э.О. ЧИГЛИНЦЕВ, Н.О.
ЖАДНОВ, Д.С. КРЮЧКОВ, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
Российский квантовый центр, Москва, Россия*

ПЕРЕДАЧА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЧАСТОТЫ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1550 НМ ПО КОРОТКОМУ УЛЬТРАСТАБИЛЬНОМУ АТМОСФЕРНОМУ КАНАЛУ

Создан атмосферный канал длиной 17 метров для передачи ультрастабильного сигнала оптической частоты. Вклад линии в относительную нестабильность передаваемого сигнала, вызванный атмосферными флуктуациями, уменьшен с помощью системы активной компенсации фазовых шумов более чем на 3 порядка и составляет $1.7 \cdot 10^{-19}$ на времени усреднения 1000 с. Вклад в неточность подавлен более чем в 400 раз и не превышает $5 \cdot 10^{-20}$.

K.S. KUDEYAROV, G.A. VISHNYAKOVA, E.O. CHIGLINTSEV,
N.O. ZHADNOV, D.S. KRYUCHKOV, K.YU. KHABAROVA,
N.N. KOLACHEVSKY

*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Russian Quantum Centre, Moscow, Russia
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia*

THE TRANSFER OF OPTICAL FREQUENCY SIGNAL AT 1550 NM VIA AN ULTRA-STABLE OPEN-AIR SHORT LINK

We have developed the 17 m open-air link for ultrastable optical frequency transfer. The frequency instability induced by atmospheric fluctuations is reduced by more than 1000 times with the help of active compensation system and reaches $1.7 \cdot 10^{-19}$ at $\tau = 1000$ s. The link contribution to inaccuracy is reduced by more than 400 times and equals $5 \cdot 10^{-20}$.

В настоящее время активно исследуются и развиваются методы когерентной передачи сигналов частоты и времени как между различными лабораториями в континентальном масштабе, так и между наземными и космическими станциями. Сеть оптических стандартов частоты [1], соединённых линиями передачи, открывает большие возможности в таких областях науки и техники, как формирование национальных и международных временных шкал, релятивистская геодезия, спутниковая навигация, интерферометрия со сверхдлинной базой, тесты фундаментальных теорий, поиск тёмной материи.

Относительные неточность и нестабильность лучших современных оптических стандартов частоты на холодных атомах и ионах не превосходят величины 10^{-18} [2, 3]. Распространённые радиочастотные методы не могут обеспечить передачу таких сигналов с сохранением их характеристик, так как вносят погрешность на уровне 10^{-16} [4]. Однако это позволяет сделать метод передачи с использованием оптической несущей по линии с активной компенсацией фазовых шумов. В мире успешно ведётся разработка и создание как стационарных, так и транспортируемых [5] стандартов частоты, что говорит о необходимости исследований в области передачи ультрастабильных сигналов как по волоконным [6], так и по открытым [7] каналам.

Доклад посвящён созданию 17-метрового атмосферного канала передачи частоты на длине волны 1550 нм. Была продемонстрирована непрерывная передача частоты в течение 11 000 секунд с активной компенсацией фазовых шумов, вносимых атмосферой, которая позволила снизить вклад линии в относительную нестабильность передаваемого сигнала с $2.6 \cdot 10^{-16}$ до $1.7 \cdot 10^{-19}$ после $\tau = 1000$ s усреднения в терминах девиации Аллана, вычисленной по данным с измерителя фазы К+К в режиме усреднения фазы. Вклад линии в относительную неточность снижен с $1.9 \cdot 10^{-17}$ до $5 \cdot 10^{-20}$.

В продолжение этой работы мы планируем исследование длинных атмосферных линий длиной до 500 м и использование беспилотного летательного аппарата с закреплённым на нём уголковым отражателем в качестве модели движущегося приёмника сигнала.

Работа поддержана грантом РФФ № 19-72-10166.

Список литературы

1. Riehle F 2017 Nat. Photonics 11 25
2. Oelker E, Hutson R B, Kennedy C J, et al. 2019 Nat. Photonics 13 714
3. Brewer S M, Chen J-S, Hankin A M, et al. 2019 Phys. Rev. Lett. 123 033201
4. Fujieda M, Piester D, Gotoh T, et al. 2014 Metrologia 51 253
5. Koller S B, Grotti J, Vogt St, et al. 2017 Rev. Lett. 118 7 073601
6. Droste S, Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W 2015 Compt. Rend. Phys. 16 5 524
7. Gozzard D R, Schediwy S W, Stone B, et al. 2018 Phys. Rev. Appl. 10 024046

Е.А. ЦЫГАНКОВ¹, С.А. ЗИБРОВ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ¹, Д.С. ЧУЧЕЛОВ¹,
М.И. ВАСЬКОВСКАЯ¹, В.П. ЯКОВЛЕВ²

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

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТООПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В РАДИОЧАСТОТНОЙ ГРЕБЁНКЕ ЧАСТОТ

Обсуждается новый метод спектроскопии магнитооптических резонансов, основанный на модуляции амплитуды резонансного РЧ поля, перемещающего магнитные подуровни основного состояния, последовательностью прямоугольных импульсов. Для резонанса на переходе $|F_g = 1, m_{F_g} = -1\rangle \leftrightarrow |F_g = 1, m_{F_g} = 1\rangle$ показано, что такой подход существенно улучшает его метрологические свойства за счёт значительного уменьшения сдвига частоты, связанного с нарушением ортогональности полей или с эллиптичностью поляризации световой волны.

E.A. TSYGANKOV¹, S.A. ZIBROV¹, V.V. VASSILIEV¹, D.S.
CHUCHELOV¹, M.I. VASKOVSKAYA¹, V.P. YAKOVLEV²

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

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

METROLOGICAL PROPERTIES OF MAGNETOOPTICAL RESONANCE IN A RADIOFREQUENCY COMB

We are investigating a new type of magnetic resonances spectroscopy, where modulation of a mixing RF field amplitude by a rectangular pulse train is used. It is shown that this approach significantly improves metrological properties of the resonance at the transition $|F_g = 1, m_{F_g} = -1\rangle \leftrightarrow |F_g = 1, m_{F_g} = 1\rangle$ due to a significant decrease in the frequency shift caused by violation of the fields orthogonality or by ellipticity of the light wave polarization.

В схеме взаимно ортогональной тройки полей (измеряемого магнитного поля \vec{B} , радиочастотного \vec{B}_{rf} , напряжённости \vec{E} линейно-поляризованного лазерного излучения) частота магнитного резонанса на указанном двухквантовом переходе слабо подвержена ориентационному, световому и РЧ сдвигам, он симметричен, однако имеет структуру, связанную с квадратичным эффектом Зеемана [1]. Когда нелинейный сдвиг частоты одноквантовых переходов ω_{B^2} превышает характерную ширину резонанса Γ , он состоит из трёх пиков, см. кривую I на Рис. 1.

В случае отличия населённости подуровней $m_{Fg} = \pm 1$ (из-за эллиптичности поляризации или нарушения ортогональности полей) амплитуды боковых пиков становятся различны, в результате чего резонанс становится асимметричным и происходит сдвиг его частоты.

В работе показано, что использование модуляции РЧ поля по закону $B_{rf}(t) = B_{rf}M(t) \cos \omega_{rf}t$, где $M(t) = (\tau/T) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(k\pi\tau/T) \cos(2\pi t/T)$, позволяет получить резонанс, регистрируемый как огибающая спектральных компонент отклика атомов (см. кривую II на Рис. 1), без боковых пиков и сдвига частоты из-за его асимметрии. Этот эффект достигается при достаточно малых τ и больших T , когда спектр поля в интервале $(\omega_B - \omega_{B^2}, \omega_B + \omega_{B^2})$ становится плоской гребённой частот [2].

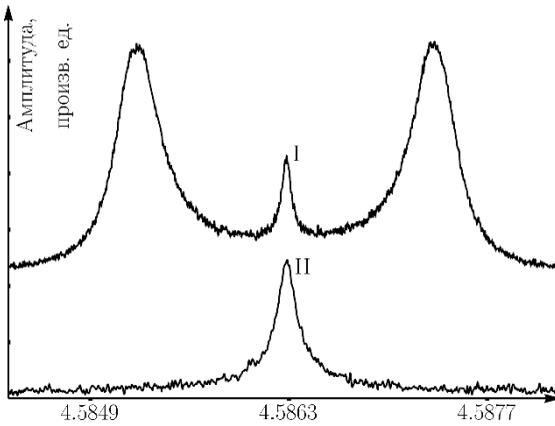


Рис. 1. Кривая I: резонанс, полученный сканированием частоты гармонического поля ω_{rf} . Кривая II: спектр отклика атомов ^{87}Rb в случае использования РЧ гребёнки с интервалом 10 Гц между спектральными компонентами. Для верхней кривой горизонтальная ось показывает величину $2\omega_{rf}/2\pi$, для нижней — частоту осцилляций отклика (в МГц). Центральная частота соответствует удвоенному линейному члену зеемановского сдвига ω_B в поле $B \sim 3.3$ Гс.

Список литературы

1. Kozlov A.N., Zibrov S.A., Zibrov A.A. and others // JETP. 2016. Vol. 122, № 5, P. 823–831.
2. Tsygankov E.A., Zibrov S.A., Zibrov A.S. and others // Opt. Lett. 2020. Vol. 45, № 18, P. 5025–5028.

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

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

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

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены и проанализированы различные методы измерений (оценки) пространственных параметров и характеристик лазерного излучения. Представлен метод измерений, основанный на использовании цифровой регистрирующей видеосистемы. Представлено разработанное программное средство для определения координат геометрического и энергетического центров пучка лазерного излучения. Приведены результаты экспериментальной апробации предложенного метода.

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

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

²Vladimir state university, Russia

ESTIMATION OF SPATIAL PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF LASER RADIATION

Various methods for measuring (evaluating) the spatial parameters and characteristics of laser radiation are considered and analyzed. The measurement method based on the use of a digital recording video system is presented. The developed software for the coordinates determining of the laser beam geometric and energy centers is presented. The results of experimental testing of the proposed method are presented.

Развитие лазерной физики, внедрение лазерных технологий во многие области науки и техники предъявляют особые требования к точностям, средствам, методам и методикам выполнения измерений параметров и характеристик лазерного излучения. При этом во многих сферах применения лазерных систем и комплексов важную роль наряду с энергетическими играют пространственные параметры излучения [1].

К настоящему моменту времени разработаны различные методы и технические средства, позволяющие выполнять измерения пространственных параметров и характеристик лазерного излучения в широком динамическом и спектральном диапазоне длин волн [2-4].

Однако, подобные методы в основном пригодны для измерений параметров непрерывного излучения со стабильной осью диаграммы направленности [5].

Кроме того применение перечисленных методов ограничено при проведении исследований распространения лазерного излучения в атмосфере, в случаях выполнения измерений параметров и характеристик широкоапертурных лазерных пучков.

Перспективный метод выполнения измерений пространственных параметров излучения основан на параллельном преобразовании мощности излучения матричным фотоприемником в различных точках проективного изображения распределения излучения в поперечном сечении лазерного пучка на диффузно отражающем экране. В результате последующей цифровой обработки зарегистрированного изображения получают измерительную информацию об интересующих параметрах и характеристиках лазерного излучения [6].

В рамках данной работы разработан алгоритм обработки зарегистрированного изображения распределения мощности для определения пространственных параметров лазерного излучения. Разработанный алгоритм реализован в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений MathLab.

С использованием программного средства, созданного на базе MathLab, проведены экспериментальные исследования пространственных параметров маломощного лазерного излучения.

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

Список литературы

1. Рузин М.В. Измерение физической и геометрической расходимости лазерного пучка во времени. Журнал «Фотоника», №3/63/2017, С. 48-53.
2. ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерения ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 1.
3. ГОСТ Р ИСО 11146-2-2008 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерения ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 2.
4. ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерения ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 3.
5. ГОСТ 26086-84 Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения.
6. A. Antipov, E. Artyukh, I. Boganova, A. Karpov, A. Morozova, A. Shepelev. The measurements of laser radiation parameters at its registration on a diffusely reflecting shield. "Modern nanotechnology and nanophotonics for science and production": proceedings of the 7th International conference. Vladimir state university, 2018. pp. 75-76.

Н.В. МОРОЗОВ^{1,2}, К.П. ГАЛСТЯН^{1,2}, Е.В. ВИЛЬШАНСКАЯ², Б.Б. ЗЕЛЕНЕР^{1,2}

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

² *Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УДВОЕНИЯ ЧАСТОТЫ ИК- ЛАЗЕРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ КАЛЬЦИЯ-40 НА УЗКОМ ПЕРЕХОДЕ

Предложен метод измерения частоты ИК-лазера для создания бихроматической магнитооптической ловушки, позволяющей создать дипольную ловушку на атомах Ca-40. Была собрана система удвоения частоты ИК-лазера, измерена эффективность удвоения, получена зависимость частоты ИК-лазера от времени при непрерывной перестройке частоты лазера внешним пилообразным сигналом.

N.V. MOROZOV^{1,2}, K.P. GALSTYAN^{1,2}, E.V. VILSHANSKAYA², B.B. ZELENER^{1,2}

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

² *Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia*

DEVELOPMENT OF AN IR LASER FREQUENCY DUALING SYSTEM FOR LASER COOLING OF CALCIUM-40 ATOMS AT A NARROW TRANSITION

A method is proposed for measuring the frequency of an IR laser to create a bichromatic magneto-optical trap, which makes it possible to create a dipole trap on Ca-40 atoms. A system for doubling the frequency of the IR laser was assembled, the doubling efficiency was measured, and the dependence of the frequency of the IR laser on time was obtained with continuous tuning of the laser frequency by an external sawtooth signal.

Для охлаждения атомов кальция-40 [1] используется переход $4\ 1S_0 \rightarrow 4\ 1P_1$ (рисунок 1), ширина которого равна 36 МГц. Для предотвращения попадания атомов на метастабильный уровень $3P_2$ используется излучение, возбуждающее атом с уровня $3\ 1D_2$ на уровень $5\ 1P_1$, из которого атом снова распадается в основное состояние. Вторая магнитооптическая ловушка (ИКМОЛ) создается на переходя из состояния $4\ 3P_2$ в $3\ 3D_3$, ширина которого составляет ≈ 60 кГц. Для получения ловушки на этом переходе нужен стабильный источник излучения. В работе [2] в качестве такого источника выступает Тm:YAG лазер, зрядной лампе с кальцием. Мы используем волоконный лазер с шириной линии генерации <50 кГц, который стабилизируется по высокостабильному интерферометру из стекла ULE.

Для измерения длины волны используется измеритель длины волны ANGSTROM WS-U с системой удвоения частоты (рисунок 2).

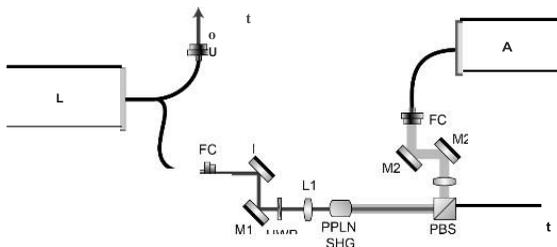


Рисунок 1 – Схема уровней атома кальция-40

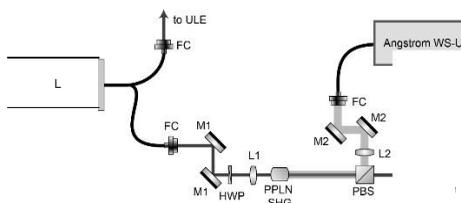


Рисунок 2 – Схема удвоения частоты лазера 1978 нм.

В качестве среды для удвоения частоты выбран кристалл PPLN SHG, легированный MgO, предназначенный для накачки с длинами волн от 1925 нм до 2250 нм. Экспериментально была определена температура кристалла $\approx 81^\circ\text{C}$. Выходная мощность на удвоенной частоте составляет 2,5 мВт при входной мощности накачки 25 мВт. Эффективность удвоения составляет 0,01%, что соответствует результатам, полученным в работах [3] – [4]. Можно заметить, что эффективность удвоения сильно зависит от входной мощности накачки.

Список литературы

1. Зеленер Б. Б. и др. Измерение температуры оптически охлаждённых атомов кальция с использованием метода дифференциальной двухфотонной спектроскопии // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 485. – №. 3. – С. 281-284.
2. Grünert J. Ultracold metastable calcium atoms in a bichromatic magneto-optical trap. – 2002.
3. Chen Y. et al. Highly efficient blue light of femtosecond pulses by second-harmonic generation in periodically poled MgO: LiNbO3 // Optics communications. – 2004. – Т. 238. – №. 1-3. – С. 201-204.
4. Neustetter C. Building a superlattice for ultracold 87 Rb-atoms : дис. – Master’s thesis, University of Innsbruck, 2007.

**А.В.ВАСИЛЬЕВ¹, А.А. ФРОНЯ^{1,2}, В.Н. ПУЗЫРЕВ²,
А.Т. СААКЯН², А.Н. СТАРОДУБ²**

*¹ ФГАОУ ВО Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409,
Россия, Москва, Каширское шоссе, 31*

*² ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 ГСП-1 г. Россия,
Москва, Ленинский проспект, д. 53*

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПЗС-МАТРИЦЫ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

В работе представлены результаты определения спектральной чувствительности ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата в оптическом диапазоне длин волн регистрируемого излучения. Показано, что существует резкая зависимость величины спектральной чувствительности от длины волны.

**A. V. VASILIEV¹, A. A. FRONYA^{1,2}, V. N. PUZYREV²,
A. T. SAHAKYAN², A. N. STARODUB²**

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

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

SPECTRAL SENSITIVITY OF THE CCD MATRIX IN THE OPTICAL RANGE

The results of determining the spectral sensitivity of the digital camera CCD-matrix in the optical wavelength range of recorded radiation had been presented in the paper. It is shown that there is a sharp dependence of the spectral sensitivity on the wavelength. После изобретения и создания приборы с зарядовой связью (ПЗС) нашли широкое применение в технике, медицине, научных исследованиях [1-3]. Детекторы на основе ПЗС используют для регистрации излучения в различных спектральных диапазонах от дальнего инфракрасного до жесткого рентгеновского излучения, включая ИК, видимое, УФ, ВУФ, мягкое рентгеновское излучение. Преимуществом детекторов на основе ПЗС является возможность хранения и передачи цифровых данных с их помощью. Данные формируются в виде изображений (монохроматических, полихроматических). В связи с этим ПЗС активно интегрируются в современные высокотехнологичные установки.

В представленной работе предложен метод измерения спектральной чувствительности ПЗС матрицы цифрового фотоаппарата. Данный метод основан на фиксации изображения источника излучения с известной величиной

излучаемой энергии и дальнейшей цифровой обработке изображения. Представленный метод позволяет оценивать значения регистрируемой энергии, используя только цифровое изображение излучающего объекта.

Приводятся результаты измерений величины спектральной чувствительности ПЗС матрицы цифрового фотоаппарата Canon EOS D30 для длин волн 0,532, 0,632 и 1,064 мкм. Максимальное значение чувствительности соответствует величине $4,8 \cdot 10^{-11}$ Дж/(см²·дел.) для длины волны $\lambda = 0,532$ мкм, минимальное – $4,2 \cdot 10^{-6}$ Дж/(см²·дел.) для $\lambda = 1,064$ мкм.

Следует отметить, что характеристики ПЗС матриц индивидуальны, о чем свидетельствуют эксперименты и анализ литературных данных. Таким образом для проведения корректных измерений с помощью ПЗС-матриц необходимо проводить калибровку каждого используемого детектора.

Список литературы

1. Yuzhong Zhang, Wuqiong Zhang, Zhe Dong, et al. Calibration and measurement performance analysis for a spectral band charge-coupled-device-based pyrometer Review of Scientific Instruments 91, 064904 (2020).
2. Piotr Sawosz, Stanislaw Wojtkiewicz, Michal Kacprzak, et al. Towards in-vivo assessment of fluorescence lifetime: imaging using time-gated intensified CCD camera. Biocybernetics and Biomedical Engineering, Volume 38, Issue 4, 2018, Pages 966-974.
3. Osamu Wakao, Ken Satou, Ayano Nakamura, et al. A compact fluorescence polarization analyzer with high-transmittance liquid crystal layer Review of Scientific Instruments 89, 024103 (2018).

P.M. MATYAKUBOVA, R.R. KULUYEV

Tashkent State Technical University TSTU, Tashkent, Uzbekistan.

TECHNOLOGICAL PROCESS OF CONVECTIVE DRYING OF BULK MATERIALS

The paper talks about convective dryers for drying bulk (granular) materials. It is especially noted that the mechanism of the convective drying process lies in the fact that during the direct interaction of a wet material with a gaseous heat carrier (hot air), due to the temperature difference between the surface of the grains of the material and the heat carrier, moisture evaporates into the gaseous medium. A diagram of grain drying is described. The graphical dependence of the moisture content of the material on time is provided. The article describes the stages of the technological process of convective drying of bulk materials.

1. Introduction

The technological process of drying granular materials, which is a combination of heat and mass transfer phenomena, accompanied by structural mechanical, and in some cases chemical changes in the dried material, is widely represented in many industries. Heat drying is characterized by high energy consumption. The problem of energy saving should be largely ensured by the creation, improvement and rational practical application of energy-saving technologies and equipment. [1]. Research aimed at improving the technologies for their production and, in particular, at determining the optimal conditions for drying granular materials, are of great national economic importance. In addition, the intensive development of farms, mini-centers for processing and storage of grain (especially selection and seed) requires the creation of energy-saving and resource-saving small-sized mobile drying equipment that allows drying or active ventilation during primary processing or storage of grain. There are currently no scientifically substantiated calculation methods and recommendations for the treatment of this class of drying equipment. [2] In large-scale industries with a capacity of 1 to 500 tons per hour of dried bulk material, the most widespread are continuous convective dryers, due to their relative simplicity and efficiency compared to dryers based on other drying methods.

Convective dryers for drying bulk (granular) materials are structurally divided into shaft-type dryers, pneumatic pipes - dryers, drum, aerial, with a fluidized and vibro-boiling bed.

Each of these types of convective dryers have certain advantages and disadvantages and the area of their rational use. For the correct choice of the type of convective dryers, let us analyze the efficiency of convective dryers for bulk materials. The latter is assessed comprehensively in terms of the costs associated with the consumption of fuel (efficiency of the dryer), electricity for moving material and gaseous heat carrier,

capital costs for the dryer and exhaust gas dust cleaning systems, dimensions and metal consumption of the apparatus.

2. Drying diagram development

The mechanism of the convective drying process lies in the fact that during the direct interaction of a wet material with a gaseous heat carrier (hot air), due to the temperature difference between the surface of the grains of the material and the heat carrier, moisture evaporates into the gaseous environment. In this case, the mass of moisture vapor is transferred into the gaseous heat carrier, due to the difference in the partial pressures of moisture vapor over the wet surface of the grains and in the surrounding gaseous environment. In other words, heat and mass transfer occurs between hot gases and moisture on the surface of the material grains. When moisture evaporates from the surface and is removed in the form of formed vapors, a moisture concentration gradient occurs in the material, which causes its internal movement from the deep layers to the evaporation surface. The speed of the process of moving moisture in the material (and, consequently, drying it) depends on the nature and form of the connection of moisture with the dry matter of the material. [3] According to the classification of P.A. Rebinder distinguishes, as already distinguished above, three forms of connection between moisture and material: chemical, physicochemical, and physicommechanical. Chemically bound water participates in the structure of the crystal lattice of the substance, is not removed during drying and therefore is not considered in the drying technology. The forces of the physicochemical nature retain water in the material, which is adsorbed and osmotically bound. Physical and mechanical bonds retain moisture in the macro- and microcapillaries of the material and structural moisture. [4] In the future, we will consider fine-grained materials containing unbound, free moisture on the surface of particles, in which water is held by capillary pressure forces. Almost every solid material in contact with humid air is capable of absorbing moisture from the environment or giving it to the environment. The direction of moisture transfer is determined by the sign of the difference in vapor pressure of the liquid in the material (P_m) and in the environment (P).

The state of the material in which it releases (desorbs) water vapor is called the wet state of the material. The magnitude of the pressure difference determines the value of the driving force and the intensity of moisture transfer.

With prolonged contact of a wet body with a gas at constant parameters, when the thermal and sorption processes end, hygrothermal equilibrium is established: the temperature of the medium ($t_{av} = t_m = \text{const}$), the partial pressures of liquid vapors in the material (P_m) and the surrounding air (P_{av}) are equal ($P_m = P_{cp} = \text{const}$) [5]. Thereafter, the moisture content of the material will remain unchanged until the temperature or relative humidity of the ambient air changes. Let us represent the graphical change in the average volumetric moisture content of the material over time (Fig. 1).

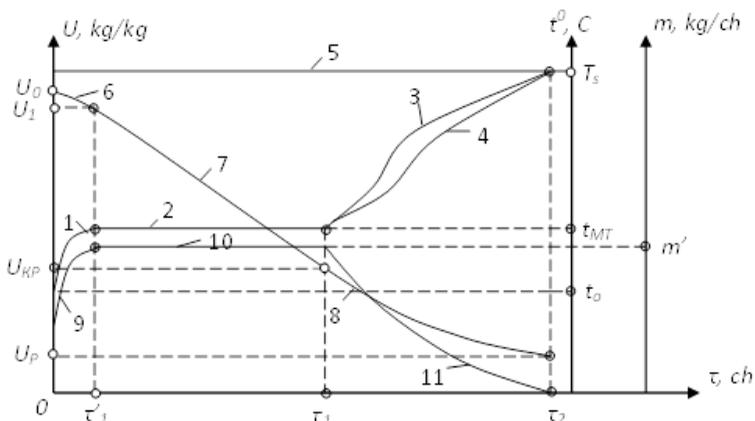


Fig. 3. Drying process diagram In coordinates: τ - drying time, U - moisture content of the material, m - drying rate, t - temperature.

The graphical dependence of the moisture content of the material on time is called the drying curve, and the drying rate on time is called the drying rate curve [6]. The change in the moisture content of the material (U) is proportional to the drying time (τ 11). Therefore, the curves of the drying rate (m) can be represented in the coordinates "moisture content - drying rate". Most materials are characterized by time dependences of material temperature and drying rate (Fig. 3). In the initial period of drying τ_1 (curve 1), the material is heated from the temperature t_0 to the temperature of saturated air (at a given moisture content), which is determined by the reading of a wet thermometer t_{MT} .

The efficiency of mass transfer processes can be estimated using the equation of mass transfer by means of convective diffusion through the evaporation surface (1):

$$G_{ВЛ} = \beta F (C_{П.Н.} - C_{П}), \quad (1)$$

Similar to the mass transfer process, the drying efficiency can be estimated using the convection heat transfer equation [8]. The amount of heat per unit time (Q , kcal / h; J / h; 1 kcal = 4.19 J), given off by the air to the evaporation surface (F , m^2), (in the first approximation F , the particle surface) will be (2):

$$Q = \alpha F (t_{cp} - t'_m) \quad (2)$$

Due to the heat Q , $G_{ВЛ}$ of water will evaporate, and the evaporation of 1 kg of water requires heat in $-1 t'_m = r$ kcal / kg (where $in = 595 + 0.47t'$ m is the heat content of the superheated steam, kcal / kg; r - heat of vaporization, kcal / kg). Hence (3),

$$Q = G_{ВЛ} \cdot r. \quad (3)$$

From this equation it is possible to obtain a new equation of mass transfer for a period of constant drying rate (4):

$$G_{ВЛ} = a / r \cdot F (t_{cp} - t_{M.T.}) = \beta t \cdot F (t_{cp} - t_{M.T.}), \quad (4)$$

Existing methods of engineering calculations using empirical dependencies and standards, as well as well-known methods of modeling and optimization of the process and drying apparatus, do not allow the development of highly efficient energy-saving drying equipment. The development of small-sized drying equipment should be based on the already accumulated theoretical and practical experience, for which, further, the analysis of dispersed materials with high internal diffusion resistance (for example, grain crops) as objects of drying, hardware design of the process, as well as existing mathematical descriptions of the drying process of such materials is given. , experimental studies of the drying process, the structure of streams in dryers, methods of optimization of processes and drying devices.

References

1. 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
2. Yusupbekov N.R., Abdurasulov F.R., Adilov F.T., Ivanyan A.I. Application of cloud technologies for optimization of complex processes of industrial enterprises // *Advances in Intelligent Systems and Computing* 896, c. 852-858 DOI: 10.1007/978-3-030-04164-9_112
3. Ginzburg A.S. Drying of food products, Moscow: Pishchepromizdat, 1960.
4. Kavkazov Yu.L. Drying technology basics. Vses. scientific and technical. Meeting. Plenary sessions, M.: "Profizdat", 1958. - p. 68-93.
5. Lebedev P.D. Calculation and design of drying plants, M. - L., "Gosenergoizdat", 1963.
6. Lykov A.V. Heat and mass transfer in drying processes, M. - L., "Gosenergoizdat", 1956.
7. Avezova, N.I., Ismatullaev, P.R., Matyakubova, P.M., Kodirova, Sh.A. Mathematical model of a heat transducer with a cylindrical heat pipeline and with a focused heat source. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1686(1), 012063
8. N.I. Avezova, P.M. Matyakubova, G.G. Boboev. Ways to develop innovative processes in grain production International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019 (2019). DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9011924.
9. Nikitin L.M. Tables of the equilibrium specific moisture content and binding energy of moisture with materials, M. - L., "Gosenergoizdat", 1963.
10. Rebinder P.A. On the forms of communication with materials during the drying process. Vses. scientific and technical. meeting. to intensify processes and improve the quality of materials during drying in the main industries and agriculture. Plenary sessions, M.: "Profizdat", 1958. - p. 20-33.
11. Yavchunovsky V.Ya. Microwave and Combined Drying: Physical Basics, Technologies and Equipment. - Saratov: Publishing house of Sarat University, 1999, -213 p.
12. Ginzburg A.S. Drying food. M.: Food industry, 1973.-528 p.
13. Atanazevich V.I. Drying of food. - M.: 2000 -198 p.
14. Ginzburg A.S. Food drying technology. - M.: Food industry, 1976.-248 p.

P. M. MATYAKUBOVA, P. R. ISMATULLAYEV, N. I. AVEZOVA, M.M.
MAHMADJONOV

Tashkent state technical University, Tashkent, Uzbekistan

SELECTION OF THE MAIN ELEMENTS OF THE TPVZHМ LIQUID MOISTURE CONTENT THERMAL TRANSDUCERS

This paper formalizes the task of optimal design of thermal transducers of moisture content of liquid materials by the criteria of linearity of static characteristic, sensitivity, accuracy and response time.

П.М.МАТЯКУБОВА, П.Р.ИСМАТУЛЛАЕВ, Н.И.АВЕЗОВА,
М.М.МАХМУДЖОНОВ

Ташкентский государственный технический университет. Ташкент, Узбекистан

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ЖИДКИХ МАТЕРИАЛОВ (ТПВЖМ)

В работе формализована задача оптимального проектирования тепловых преобразователей влагосодержания жидких материалов ТПВЖМ по критериям: линейность статической характеристики, чувствительность, точность и быстродействие и на основании результатов проведенных исследований разработана конструкция и измерительная схема теплового преобразователя влагосодержания жидких материалов.

The main task of parametric design of thermal transducers of moisture content of liquid materials TTMCLM is to obtain optimum parameters of all main elements, obtain their characteristics satisfying the set requirements and the criterion of their optimization.

One of the important tasks in the optimal parametric design of the TTMCLM is the selection of the optimality criterion I.

Typical input data for the design of the TTMCLM are: conversion range [Wmin, Wmax], parameters of the heating and thermosensitive elements; bridge circuit and liquid material flow rate stabilization device [1].

As a result of the optimal parametric design, the optimal parameters are to be found on the basis of research: UM0, K0, PNE0, RTHE, d0, V0, which in general constitute the main parameters of the TTMCLM.

$$\bar{a} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, \} \quad (1)$$

As a result of the optimization, it is necessary to find such parameters of the TTMCLM at which the optimum value of the optimality criterion is achieved

$I(\bar{a})$, i.e.

$$I(\bar{a}) = aptI(a), \bar{a} \in D\bar{a}, \quad (2)$$

where: $aptI(\bar{a})$ the optimum value $I(\bar{a})$ $D\bar{a}$ - region of acceptable solutions

If, denote by P the search area, then

$$\Pi\{\bar{a}: b_i \leq a_i \leq c_i, i = \bar{1}, \bar{n}\}, \quad (3)$$

where: b and c are minimum and maximum values a_i ;

During the design process, it must be taken into account that the RTG will only perform its function and remain functional if the input value W_{in} is within the measuring range i.e.

$$W_{in} \in (W_{min} W_{max}) \quad (4)$$

where: W_{min}, W_{max} - are the minimum maximum values of the input variable.

Mathematical models of TTMCLM are used to find optimal parameters of TTMCLM, which show that they are, firstly, informative, secondly, adequate to real measuring transformation processes (experimental data given well confirm adequacy of mathematical models), thirdly, output quantities and parameters of mathematical models reflect relation of varied parameters with output influences rather precisely, fourthly, these mathematical models are rather simple and easy to implement on PC. All of the above shows that the mathematical models satisfy the requirements for mathematical models used for optimal design of TTMCLM [3].

The greatest number of challenges in optimizing the design of RTGs relate to increasing sensitivity, improving accuracy, linearity of the static response and speed. Formalization of the design problem of the TTMCLM according to the criterion of linearity and sensitivity of the static characteristic. The design problem of the TTMCLM according to the criteria of linearity and sensitivity of the static characteristic is formulated as follows. The structure is chosen and, consequently, the static characteristic of TTMCLM is defined, for example, for the mode of operation $P_{noe} = \text{const}$ in the form of the formula

$$U_{out} = U_M \frac{K\Delta R T_1}{(K+1)^2 \cdot R T_1} \quad (5)$$

In general, the static characteristic (4) can be represented as

$$U_{out} = f[W_{out}, \bar{a}(\bar{y})], \quad W_{out} \in \{W_{outputmax}, W_{outmin}\}, \bar{a}(\bar{y}) \in D\bar{a}$$

where: $\bar{a} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ - is a vector of varying parameters;

$\bar{y} = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\}$ - is a vector of influencing parameters;

n is the number of parameters to be varied; m is the number of influencing parameters;

As a result, an optimum vector of parameters can be written down[4].

$$\bar{a}(\bar{y}) \in D\bar{a} \quad (6)$$

to

$$I[\bar{a}(\bar{y})] = aptI[\bar{a}(\bar{y}), W_{in}], \quad (7)$$

$$D\bar{a} = \{\bar{a}: b_i \leq a_i \leq c_i, a \geq 0, i = \bar{1}, \bar{n}\} \quad (8)$$

The problem of increasing the linearity of the static characteristic of the TTMCLM is solved by approximating the real non-linear static characteristic of the TTMCLM type

(7) by a linear dependence. The static characteristic can then be written as a linear relationship:

$$U_{out} = AW_{in} + B \quad (9)$$

Using the quadratic integral criterion of closeness of functions we have

$$MinI = \int_{W_{vxmin}}^{W_{inhmaxf}} \{U_{out}(W_{in}) - A^*W_{in} - B\}dW_{in}, \quad (10)$$

or

$$MinI = \int_{W_{vxmin}}^{W_{inhmaxf}} \{f[W_{out}, \bar{a}(\bar{y})] - A^*W_{in} - B\}dW_{in}, \quad (11)$$

Having solved the problem, find the values of $A = A[W_{in}, \bar{a}(\bar{y})]$; $B = B[W_{in}, \bar{a}(\bar{y})]$; $\bar{a}(\bar{y}) \in D\bar{a}$ and the parameters $\{\bar{a}\}$, at which these coefficients are realized. The problem of high sensitivity is easily solved after the problem of high linearity of the static characteristic, because these problems are very closely related[6]. In order to solve the high sensitivity problem it is necessary to determine the optimum values of the vector $-\bar{a}(\bar{y}) = a(\bar{y})$, which provide

$$\text{Max } A[W_{in}, \bar{a}(\bar{y})], \bar{a} \in D\bar{a}, W_{\bar{e}} \in \{W_{outputmax}, W_{outputmin}\} \quad (12)$$

Formalization of the design problem of the TTMCLM according to the accuracy and performance criteria. As shown in Chapter III, the accuracy of the TTMCLM is mainly determined on the basis of the entropic error $\Delta \ni$ and the optimal parametric design problem for the accuracy criterion of the TTMCLM can be solved by minimizing the error $\Delta\theta$ which is determined by the basic components σ_{NE} , δ_{MC} , δ_{TUE} and δ_{US} , which are the RMS errors of the corresponding heating element, bridge circuit, thermal sensing element and liquid material flow stabilization device.

The required parameters of the TPVHM $\bar{a} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ are determined so that

$$I[W_{in}, \bar{a}(\bar{y})] = \min \Delta\theta[W_{in}, \bar{a}(\bar{y})] \quad (13)$$

at

$$W_{out} \in \{W_{outmax}, W_{outmin}\},$$

In chapter III, the dynamic characteristics of the TTMCLM were investigated, which determine the performance of the TTMCLM and the main indicator of the performance of the TTMCLM TTTMCLM and therefore the design for the performance criterion of the TTMCLM can be reduced to the problem of finding the minimum of the TTTMCLM

$$I[W_{in}, \bar{a}(\bar{y})] = \min T_{TPVHM}[W_{in}, \bar{a}(\bar{y})] \quad (14)$$

at

$$W_{out} \in \{W_{outputmax}, W_{outputmin}\}, \bar{a} \in D\bar{a}$$

The calculation and selection of the optimum parameters of the TTMCLM is carried out according to the developed algorithm (Fig. 1) [5]. Let us briefly consider the main steps of the block diagram of the algorithm shown in Figure 1.

Module 1 prepares the raw data set based on the requirements of the liquid material monitoring and control systems.

Module 2 calculates the temperature distribution along the heat pipe and achieves the specified distributions with Modules 3 and 4.

Module 5 calculates the resistance thermometer and measuring circuit parameters, the results of which are used to form the optimization criteria, constraints and to select the optimum design search method.

In module 6, the selection of the optimisation criteria is carried out.

Module 7 selects the initial approximations for the parameters to be varied $\bar{a}'' = \{a''_1, a''_2, a''_3, \dots, a''_n\}$

Module 8 defines the P flow area.

Module 9 checks that the initial approximations belong to the \underline{a} to the range of valid values Yes.

Module 10 is used to select the parametric optimisation method.

In module 11, a multi-extremity check of the original problem is carried out.

Module 12 checks whether the optimum solution belongs to the search area \underline{P} of the search area P.

Module 13 outputs calculated data and parameters (in the form of tables and graphs).

As a result of the calculation and design, the parameters of the TTMCLM are obtained.

$$a_1 = U_M = 6V; a_2 = K = 1; a_3 = P_{NE} = 1,6W$$

$$a_4 = l_{NE} = 12 \cdot 10^{-3}m; a_5 = d = 4 \cdot 10^{-3}m; a_6 = v = 0,05 m/s.$$

Development and practical application of a thermal converter for the moisture content of liquid materials.

Mathematical models and basic characteristics of the thermal transducer for the moisture content of liquid materials.

It has been shown that in the structure of an automatic continuous thermal moisture meter to ensure constant velocity of liquid material in the measuring section of the thermal transducer pipe, special flow rate (velocity) stabilization devices of liquid material are used. As shown above, constant level tank and different types of liquid pumps are used as flow rate stabilization devices of liquid material. (gear pumps, centrifugal pumps, etc.) [7].

The heat transducer of liquid material can be made on the basis of a metal, plastic or glass tube 2, inside of which a cylindrical probe 3 with a thermosensitive element 4 and a heating element 5 and an additional cylindrical probe 6 with a compensating thermosensitive element 7 are symmetrically crosswise to the liquid material flow and both thermosensitive elements 4 and 7 are included in the adjacent arms of the bridge measuring circuit. In chapter II it is shown, that the given thermal transducer of moisture content of liquid materials can operate in several modes: 1 - at constant power of heating $P_{ne} = \text{const}$; 2 - at a constant temperature difference between the thermosensitive elements 4 and 7; 3 - at discrete switching on and off of the heating element 5 with a special measuring circuit for measuring cooling time of the thermosensitive element 4 after discrete switching on of the heating element 5 [2].

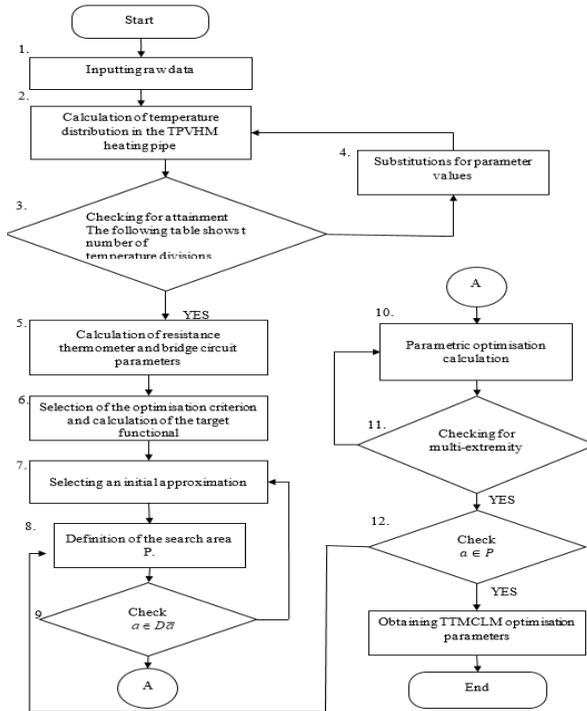


Fig 1. block diagram of the TTMCLM optimization algorithm

Figure 2. Shows the design diagram of a liquid material moisture content thermal transducer with liquid material flow rate stabilization unit 1 in the pipeline measuring section 2.

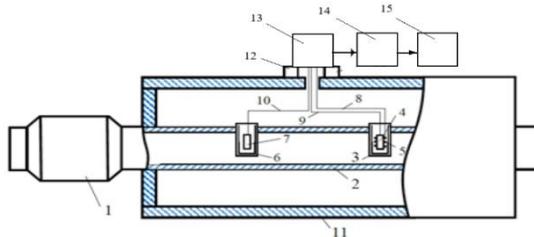


Fig. 2. The design of the thermal converter of moisture content of liquid material with a device stabilizing the flow rate of liquid material; 1 - unit device stabilizing the flow rate of liquid material; 2 - measuring section of the tube of the thermal converter; 3 - main cylindrical probe; 4 - heat-sensitive element; 5 - heating element; 6 - additional cylindrical probe; 7-compensation thermosensitive element;8-heating element outlet wires with resistance R_{noe} ;9-thermosensitive element outlet wires R_{t2} ;10-

thermosensitive element outlet wires Rt1;11-hull;12- plug socket; 13-measuring diagram; 14-measuring information signal processing block; 15-indicator device.

Among the above-mentioned operating modes, the thermal moisture transducers are the easiest to implement, the most reliable and suitable not only for systems for the automatic control of the moisture content of liquid materials, but also for systems for the automatic control of the moisture content of liquid materials that are transported continuously through pipelines.

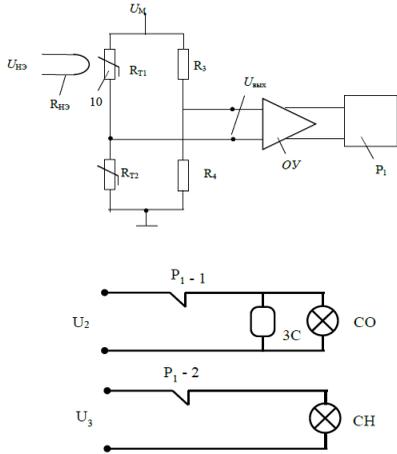


Fig. 3 Measuring diagram for monitoring the flow of liquid material. It should also be pointed out that the developed liquid material moisture content transducer also makes it possible to monitor the presence of liquid material flow in the pipeline.

Fig. Figure 3 shows a measurement circuit for monitoring the flow of liquid material. If there is no flow and the resistance of the arms of the bridge circuit is selected $R_{T1} = R_{T2} = R_3 = R_4$ output voltage of the bridge circuit at the switched off heating element RNE will be equal to zero ($U_v = 0$) and intermediate relay P1 in the absence of voltage with its normally closed contact P1-1 is switched off the sounder and SS alarm. The bridge circuit is out of equilibrium ($U_v \neq 0$) in the presence of liquid material flow. P1 is switched off and with its normally open contact P1-1 switches on the optical signal CH presence of liquid material flow in the pipeline.

This thermal converter allows the moisture content of liquid materials, such as glycerin solution, transformer oil and cottonseed oil, to be monitored in a continuous flow.

References:

1. 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

2. Yusupbekov N.R., Abdurasulov F.R., Adilov F.T., Ivanyan A.I. Application of cloud technologies for optimization of complex processes of industrial enterprises // *Advances in Intelligent Systems and Computing* 896, c. 852-858 DOI: 10.1007/978-3-030-04164-9_112
3. O.Sh. Khakimov, P. M.Matyakubova, G.A.Gaziev. The dzhaborov. Evaluation of ultrasound reflection coefficient measurement result and its uncertainty by the method of linearization. 2019 IEEE 8 International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL 2019.
4. N.I. Avezova, P.M. Matyakubova, G.G. Boboev. Ways to develop innovative processes in grain production International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019 (2019). DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9011924.
5. Matyakubova P. M., Kuluyev R. R. Ensuring the reliability of results in the calibration of moisture meters. - *Journal Devices*, in 2018, no. 2 (212), Pp. 8-9.
6. Avezova N.I., Ismatullaev P.R., Matyakubova P.M., Kodirova Sh.A. Mathematical model of a heat transducer with a cylindrical heat pipeline and with a focused heat source. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1686(1), 012063
7. Avezova N.I, Ismatullayev P.R, Matyakubova P.M, Boboyev G.G. Multifunctional Heat Converter Moisture Content of Liquid Materials. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019, 2019, 9012041

P. M. MATYAKUBOVA, SH.A. QODIROVA, M.M. MAHMADJONOV

Tashkent state technical University, Tashkent, Uzbekistan

THE APPLICATION OF INFRARED SPECTROSCOPY IN SCIENCE AND TECHNOLOGY

The work revealed that spectroscopy deals with the description of atoms, ions, radicals and molecules on the basis of record and decipher their ranges. IR spectroscopy is a fundamental method for studying the structure of chemical compounds. Modern applications of infrared spectroscopy in various fields of science and technology are considered. The review of the objects investigated by the experts using this method is given. It is noted that not all features of infrared spectroscopy are used. The method is suitable for quantitative analysis as well as for the study of absorption spectra in far and close regions of wavelength

П.М.МАТЯКУБОВА, Ш.А.КОДИРОВА, М.М.МАХМУДЖОНОВ

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

В работе было выявлено, что спектроскопия занимается описанием атомов, ионов, радикалов и молекул на основе регистрации и расшифровки их спектров. ИК-спектроскопия является фундаментальным методом исследования структуры химических соединений. Рассмотрена современная практика применения ИК-спектроскопии в различных областях науки и техники. Приведен обзор объектов, которые эксперты исследуют данным методом. Отмечено, что используются далеко не все возможности ИК-спектроскопии. Метод пригоден для количественного анализа, а также исследования спектров поглощения в дальней и ближней волновых областях

The method of analysis is based on record of the infrared-absorption spectra of a question. The absorption of a matter in the infra-red region happens due to the fluctuations of atoms in molecules. Fluctuations are divided into valence (when the distance between atoms changes in the course of the fluctuation) and vibrational (when the angles between bonds change in the course of the fluctuation). Transitions between various vibration states are quantized in the molecule, because of which absorption in the infrared region has the form of a spectrum, where each vibration has its own wavelength. It is clear that the wavelength for each oscillation depends on which atoms are involved in it and, besides, it has not enough dependence on their environment. That point is, for each functional group (C=O, O-H, CH₂, etc.) vibrations of a particular wavelength are characteristic, more precisely, even for each group a number of vibrations (respectively, bands in the infrared spectrum) are characteristic. [3]

Identification of connections according to spectral data is also based on these properties of IR spectrums.

First of all, the method of infrared spectroscopy is not a separating method, that is, when studying a substance it may turn out that it was actually a mixture of several substances, which of course will greatly distort the results of the interpretation of the spectrum. And yet, it is not enough correct to speak of a definite identification of a substance by infrared spectroscopy, as the method is more forwardly to identify certain functional groups, rather than their numbers in a compound and the way they are bound to each other.

Spectroscopy (from spectrum and Greek skopeo - to look) is a field of physics dedicated to the study of the intensity distribution of electromagnetic radiation over wavelengths or frequencies. Spectroscopic methods study energy levels and structure of atoms, molecules and macroscopic systems formed from them, quantum transitions between energy levels of interactions of atoms and molecules, as well as macroscopic characteristics of objects - temperature, density, speed of macroscopic motion, etc. The most important applications of spectroscopy are spectral analysis, astrophysics, and the study of the properties of gases, plasma, liquids and solids. [1]

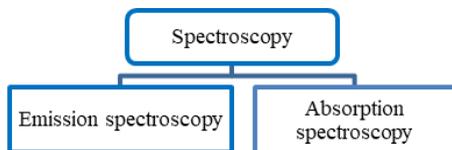


Figure 1. Classification of spectroscopy by type of spectrum.

According to the type of spectra, a distinction is made (Fig. 1) between emission spectroscopy, which studies emission spectra, and absorption spectroscopy, which examining absorption spectra. Spectroscopy is divided by the type of object studied (as in Figure 2) into atomic and molecular spectroscopy, plasma spectroscopy and condensed matter spectroscopy, in particular crystal spectroscopy. In the 1970s and 80s spectral studies of surfaces and thin films - surface spectroscopy - emerged.

The ranges of wavelengths (in descending order) or frequencies (in ascending order) are (Figure 3) The following types of spectroscopy are distinguished according to their wavelength range (in descending or ascending order of frequency): radio spectroscopy, microwave spectroscopy, submillimeter spectroscopy, infrared spectroscopy, optical spectroscopy (including near-infrared, visible and partially UV spectrum areas and distinguished mainly by transparency of optical materials - glass, quartz, etc.), UV-visible spectroscopy, X-ray spectroscopy.

According to the nature of the interaction of radiation with matter, spectroscopy is divided into linear (conventional) spectroscopy and non-linear spectroscopy, which has emerged through the use of lasers to excite spectra[4]. The use of tunable dye solution

lasers and semiconductor diode lasers, as well as the use of electronic digital spectra record methods, resulted in very high spectral resolution and high precision of spectral measurements.

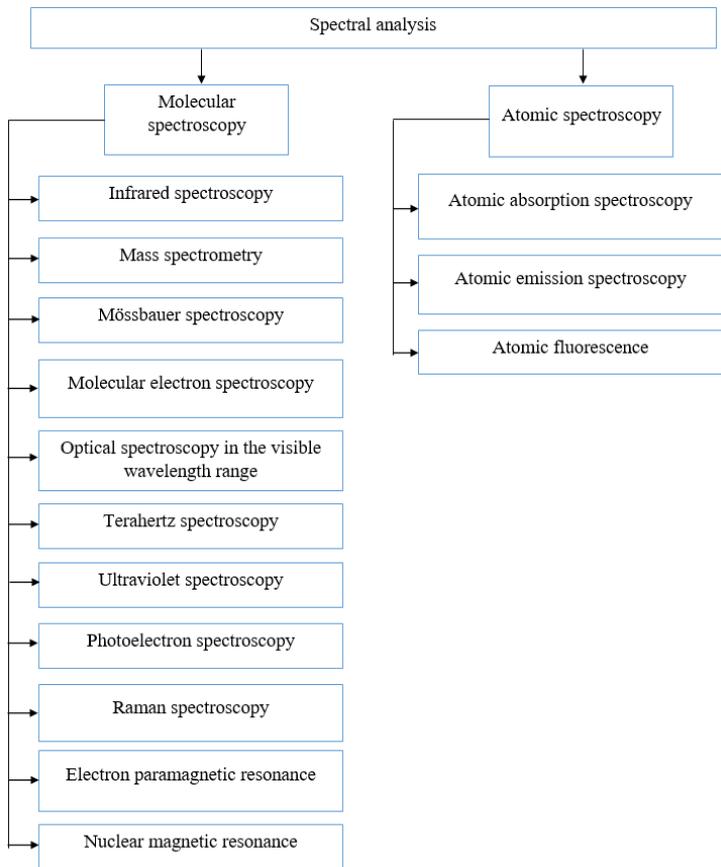


Figure 2. Classification of spectroscopy by type of object under study. The ranges of wavelengths (in descending order) or frequencies (in ascending order) are (Figure 3) The following types of spectroscopy are distinguished according to their wavelength range (in descending or ascending order of frequency): radio spectroscopy, microwave spectroscopy, submillimeter spectroscopy, infrared spectroscopy, optical spectroscopy (including near-infrared, visible and partially UV spectrum areas and distinguished mainly by transparency of optical materials - glass, quartz, etc.), UV-visible spectroscopy, X-ray spectroscopy. According to the nature of the interaction of radiation with matter, spectroscopy is divided into linear (conventional) spectroscopy and non-linear spectroscopy, which

emerged through the use of lasers to excite spectra[5]. The use of tunable dye solution lasers and semiconductor diode lasers, as well as the use of electronic digital spectra recording methods, resulted in very high spectral resolution and high precision of spectral measurements.

Spectroscopy is also divided according to excitation and observation methods of the spectra. Acousto-optical spectroscopy, coherent spectroscopy, saturation spectroscopy, heterodyning spectroscopy, modulation spectroscopy, multiphoton spectroscopy, femto- and picosecond spectroscopy, phonon echo spectroscopy, quantum beats and other methods of laser spectroscopy are widely used. Fourier spectroscopy using high-resolution Fourier spectrometers has developed considerably. [6]

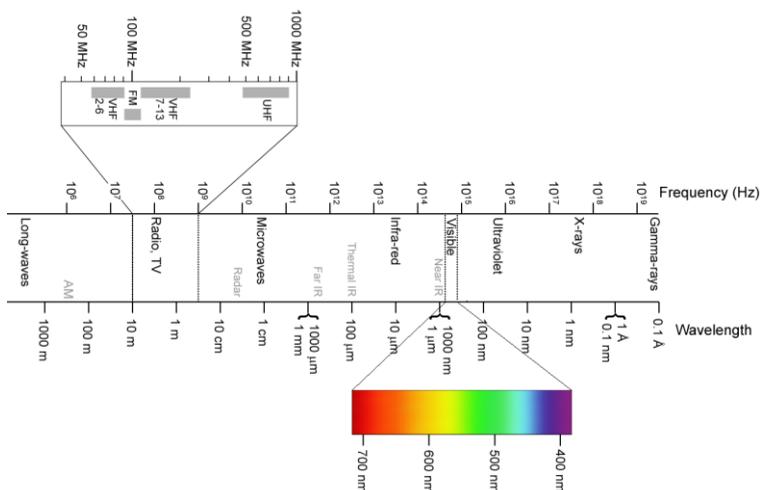


Figure 3. Classification of spectroscopy by wavelength range.

Experimental investigation of spectra is carried out using spectral instruments - monochromators, spectrometers, spectrographs, spectrophotometers, spectroanalyzers. Spectroscopy in the broad sense also includes nuclear spectroscopy, which includes alpha-, beta-gamma spectroscopy, as well as the spectroscopy of neutrons, neutrinos and other elementary particles[7]. Atomic particle distribution by mass and energy is studied by mass spectroscopy, intensity of sound by its frequency - acoustic spectroscopy, electrons by their energy - photoelectron spectroscopy, X-ray electron spectroscopy, time-of-flight spectroscopy, Mössbauer spectroscopy etc.

The widespread use of infrared spectroscopy to solve problems in industry and the fuel and energy sector has own long history and is now growing rapidly, covering new sections and areas. This is reflected in the increasing sales of IR spectrometers in various classes. Other instruments can be used for similar applications, but they are slower or more expensive, or have higher demands on service personnel. In some cases

infrared spectroscopy is the only suitable method, for example in the semiconductor industry.

The fact that infrared spectroscopy is applicable to the study of any chemical substance makes it applicable to all areas of industry to solve most problems [8]. However, the omnivorous of IR spectroscopy also has its disadvantages, especially when a single component has to be isolated from a complex mixture. For Raman spectroscopy, several techniques are available for solve such problems. These are resonance Raman spectroscopy and Raman spectroscopy with an inverted surface.

Infrared spectroscopy is based on the phenomenon of the absorption of infrared radiation by chemical substances and the simultaneous excitation of molecular vibrations. Infrared radiation is an electromagnetic wave and is characterized by a wavelength λ , a frequency ν and a wave number, $\bar{\nu}$ which are related by the following relationship:

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{(c/n)} = \frac{1}{\lambda'}$$

where c is the speed of light and n is the refractive index of the medium.

In absorption spectroscopy, of which infrared spectroscopy is a special case, molecules absorb photons of a certain energy, which is related to the frequency of the electromagnetic wave via Planck's constant:

$$E_p = h\nu$$

When a photon is absorbed, excitation - an increase in energy of the molecule occurs: it moves from the ground vibrational state E_1 to some excited vibrational state E_2 , so that the energy difference between these levels equals the energy of the photon.

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu = hc\bar{\nu}$$

The energy of the absorbed infrared radiation is consumed to excite vibrational transitions for substances in the condensed state. For gases, absorption of a quantum of infrared radiation leads to vibrational and rotational transitions[2].

An important advantage of infrared spectroscopy has the ability to monitor emitted gases or gaseous media, which is difficult to do using other methods.

References

1. Xaliullin F.A., Valieva A.R., Kataev V.A. *Infrakrasnaya spektroskopiya v farmatsevticheskom analize*. GEOTAR-Media, 2017, 160 p.
2. Yefimova A.I., Zaytsev V.B., Boldyrev N.Yu., Kashkarov P.K. *Optika: infrakrasnaya furge-spektrometriya*. Uchebnoe posobie dlya vuzov. Yurayt, 2018, 143 p.
3. Kuptsov A.X., Jijin G.N. *Furге-KR i Furге-IK spektry polimerov*. *Texnosfera*, 2014, 696 p.
4. Astapenko V.A. *Opticheskie informatsionnye tehnologii*. MFTI, 2015, 181 s.
5. 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, p. 873-879. DOI: 10.1007/978-3-030-04164-9_115
6. Yusupbekov N.R., Abdurasulov F.R., Adilov F.T., Ivanyan A.I. Application of cloud technologies for optimization of complex processes of industrial enterprises // *Advances in Intelligent Systems and Computing* 896, p. 852-858 DOI: 10.1007/978-3-030-04164-9

7. O.Sh. Khakimov, P. M.Matyakubova, G.A.Gaziev. The dzhaborov. Evaluation of ultrasound reflection coefficient measurement result and its uncertainty by the method of linearization. 2019 IEEE 8 International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL 2019.
8. N.I. Avezova, P.M. Matyakubova, G.G. Boboev. Ways to develop innovative processes in grain production International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019 (2019). DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9011924.
9. Matyakubova P. M., Kuluyev R. R. Ensuring the reliability of results in the calibration of moisture meters. - Journal Devices, in 2018, no. 2 (212), Pp. 8-9.
10. Avezova, N.I., Ismatullaev, P.R., Matyakubova, P.M., Kodirova, Sh.A. Mathematical model of a heat transducer with a cylindrical heat pipeline and with a focused heat source. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1686(1), 012063
11. Avezova, N.I, Ismatullayev, P.R, Matyakubova, P.M, Boboyev, G.G. Multifunctional Heat Converter Moisture Content of Liquid Materials. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019, 2019, 9012041

**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

A. BISWAS

*Department of Physics, Chemistry and Mathematics, Alabama A&M University, Normal,
AL 35762—4900, USA*

CUBIC-QUARTIC OPTICAL SOLITON PERTURBATION WITH LAKSHMANAN-PORSEZIAN-DANIEL MODEL BY SEMI-INVERSE VARIATIONAL PRINCIPLE

The retrieval of bright 1-soliton solution to the perturbed Lakshmanan-Porsezian-Daniel equation is studied. The adopted integration scheme is the semi-inverse variational principle. The perturbation terms appear with maximally permitted intensity. The parametric constraints that naturally emerge are exhibited.

This work is on the retrieval of a single bright soliton solution to perturbed Lakshmanan-Porsezian-Daniel (LPD) equation that is studied with cubic-quartic (CQ) dispersive effects. The dynamics of soliton propagation is the outcome of a delicate balance between chromatic dispersion (CD), also known as group velocity dispersion, and the nonlinear term that is also known as self-phase modulation (SPM). The nonlinearity that is considered in this work is of cubic type that is that is referred to as Kerr type nonlinearity.

Occasionally, it so happens that CD runs low because of optical fiber abnormalities or other such external factors. This would lead to a compromise to the existence of the necessary balance between CD and SPM for solitons to sustain. One of the adverse measures to maintain the necessary balance between dispersion and nonlinearity is to discard CD, and instead introduce third-order dispersion (3OD) and fourth-order dispersion (4OD). This would together comprise of CQ dispersive effect and the solitons are thus known as CQ solitons.

The perturbation terms that would be included in the LPD model to get a better understanding of the soliton dynamics are self-steepening (SS) effects and nonlinear dispersions. The SS term is considered to avoid the formation of shock waves. These perturbation terms are considered with full nonlinearity, which means that the perturbation terms are with maximum allowable intensity. This is because Benjamin-Fier stability analysis is not studied in the work to address this cap on light intensity. Thus, the model that is going to be addressed in the talk would be CQ-LPD equation that appears with a few perturbation terms with full nonlinearity and are of Hamiltonian type.

When perturbation terms appear with full nonlinearity or with maximum allowable intensity, the integrability of the extended or perturbed model is lost, unless the degree of nonlinearity of the perturbed terms is the same as the degree of nonlinearity of the SPM effect. Thus, exact soliton solutions are not retrievable for such a model even though there exists a wide range of integration schemes, in the literature, that can retrieve exact 1-soliton solutions. Thus, the semi-inverse variational principle (SVP)

comes to the rescue. In this approach, it is the stationary integral that is first constructed by the aid of traveling wave hypothesis. Subsequently, the variation of the stationary integral is optimized with respect to the amplitude and inverse width of the soliton that leads to a coupled set of equations to describe their variation. Upon uncoupling, the perturbed soliton of the model is established analytically. It must be noted that such an analytical 1-soliton solution is not exact. But an analytical soliton solution is established that is very important and helpful in fiber-optic communication system.

One of the major shortcomings of this approach is that it is not possible to recover a perturbed analytical dark 1-soliton solution. The reason is that the stationary integral is rendered to be divergent. A similar reasoning exists for singular solitons. Thus, this approach has its limitation. Another factor is that the analytical bright 1-soliton solution is not exact although it serves well in the fiber-optic communications technology. One last issue is that the consideration of third and fourth order dispersion effects would lead to pronounced soliton radiation. This effect is not considered in this talk as the focus is on the core soliton. The study of soliton radiation would be conducted later using the method of “beyond all-order asymptotics”.

А.В. АКСЕНОВ, К.П. ДРУЖКОВ

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Москва, Россия*

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия*

О СООТВЕТСТВИИ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ УРАВНЕНИЙ МЕХАНИКИ ПРИ ЛАГРАНЖЕВОМ И ЭЙЛЕРОВОМ ОПИСАНИИ

Известно, что в лагранжевом описании многие уравнения механики сплошной среды являются уравнениями Эйлера-Лагранжа. Такие уравнения удовлетворяют соответствующим вариационным принципам. Естественно возникает вопрос о возможности перенесения вариационных принципов из лагранжева описания в эйлерово. В работе показано, что для уравнений в лагранжевых переменных, которые являются 1-нормальными уравнениями Эйлера-Лагранжа, аналогичного вариационного принципа в эйлеровых переменных быть не может.

A. V. AKSENOV, K. P. DRUZHKO V

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

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

ON THE CORRESPONDENCE OF VARIATIONAL PRINCIPLES FOR THE EQUATIONS OF MECHANICS IN THE LAGRANGE'S AND EULER'S DESCRIPTION

It is known that in the Lagrangian description, many equations of continuum mechanics are the Euler-Lagrange equations. Such equations satisfy the corresponding variational principles. The question naturally arises about the possibility of transferring the variational principles from the Lagrangian description to the Euler one. It is shown in the paper that for equations in Lagrangian variables, which are 1-normal Euler-Lagrange equations, there can be no analogous variational principle in Euler variables.

С.Н.АНДРИАНОВ

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОСТИ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В статье рассмотрены проблемы формирования распределенных систем управления, обеспечивающих необходимую эффективность управляющей системы с целью формирования оптимальных элементов управляющих пучка частиц (в рамках заданных параметров). Особое внимание в работе уделяется проблемам взаимодействия частиц пучка, как с элементами управляющих систем, так и между частицами пучка. Подобный подход базируется на методах и технологиях теории оптимального управления динамическими системами.

S.N.ANDRIANOV

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

SOME PROBLEMS OF OPTIMALITY PARTICLE DYNAMICS IN ACCELERATING SYSTEMS

The article deals with the problems of forming distributed control systems that provide the necessary efficiency of the control system in order to form optimal elements of the control particle beam (within the specified parameters). Particular attention is paid to the problems of interaction of the beam particles, both with the elements of control systems and between the beam particles. This approach is based on the methods and technologies of the theory of optimal control of dynamic systems.

Большинство существующих методов моделирования динамики пучков частиц базируются на использовании численных методов. Следует отметить, что подобные подходы вычислительно не эффективны и не достаточно гибки для решения достаточно широкого класса задач. Прежде всего, это связано с необходимостью проведения огромного числа вычислительных процедур. С другой стороны развитие методов и технологий компьютерной алгебры позволяет существенно расширять возможности компьютерного моделирования. В данной работе рассматриваются технологии и вычислительные методы, позволяющие использовать методы и инструменты компьютерной алгебры для решения широкого класса задач оптимизации систем управления пучками частиц, как для не больших ускорителей, так и для циклических систем. Необходимо отметить, что получаемые результаты моделирования в терминах компьютерной математики (например, с использованием пакета Mathematica [1]). Следует отметить, что результаты, получаемые с использованием систем компьютерной алгебры, могут быть размещены в специальных хранилищах, и могут быть использованы по мере необходимости. При этом формирование этих хранилищ обеспечивает возможность использования формально абстрактных решений (например, в виде символьных формул) по мере

необходимости могут быть реализованы в виде двух и трехмерных объектов, с помощью которых исследователи могут проводить поиск оптимальных решений и сохранять их в соответствующих база данных. Заметим, что процедуры формирования символьных формул достаточно громоздки. Однако как выполняемые процедуры, так и соответствующие результаты могут не только храниться в соответствующих банках данных, и использоваться как в виде двумерных и/или трехмерных объектов, но и осуществлять поиск оптимальных решений с использованием методов параметрического моделирования [2,3]. Необходимо отметить, что современные системы формирования распределенных систем управления в ускорительных системах и комплексах с учетом использования символьных методов позволяют осуществлять поиск оптимальных решений не только в виде численных результатов, графических (двух- и трех мерных) объектов, но и осуществлять визуальные процедуры с целью поиска «оптимальных» решений. Особое внимание необходимо уделять проведению параметрических исследований в ускорительных системах с большим числом управляющих элементов и параметров (например, в циклических системах и комплексах), см., например, [4,5]. При этом особое внимание в работе уделяется проблемам взаимодействия частиц пучка, как с элементами управляющих систем, так и между частицами пучка. Предлагаемый в работе подход базируется на методах и технологиях теории оптимального управления динамическими системами. При этом необходимые параметрические исследования проводились с целью как сравнения с алгоритмами оптимизации, так и для оценки точности конструируемых моделей. Необходимо отметить, что алгоритм градиентного спуска обеспечивает лучшие решения по мере приближения к оптимальным решениям. Разделение прямоугольников потребовало примерно вдвое больше итераций для схождения, чем градиентный спуск, а генетический алгоритм работал немного лучше, чем полное параметрическое исследование.

Список литературы

1. Mathematica (Система компьютерной алгебры).
2. Andrianov Serge, Edamenko N.S. Parametric optimization of particle separation systems. // June 2014 DOI: 10.1109/BDO.2014. Conference: 2014 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (BDO).
3. Андрианов С.Н. Динамическое моделирование систем управления пучками частиц. // Издат. СПбГУ, 2004, Р. 368.
4. Проект NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility). Объединённый институт ядерных исследований. Дубна, Россия.
5. Подзывалов Е.А. Метод глобально-оптимального поиска структуры канала согласования. // Труды 42-й междуна. научн. конф. аспирантов и студентов. /Под ред. А.С.Ерёмина, Н.В.Смирнова. Изд. Санкт-Петербург. университета, 171-177. 2011.

Е.В. АНТОНОВА, Н.А. КУДРЯШОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РЕШЕНИЕ В ВИДЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ И УЕДИНЕННЫХ ВОЛН ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА

Рассмотрено обобщенное нелинейное уравнение Шредингера с учетом производной третьего порядка, которое может использоваться при описании распространения импульсов в оптическом волокне. Задача Коши для этого уравнения не решается методом обратной задачи рассеяния, поэтому решение уравнения ищется в переменных бегущей волны. Принимая во внимание эти переменные, получена система дифференциальных уравнений для мнимой и действительной части. Найдены аналитические решения, выраженные через экспоненциальную функцию и эллиптическую функцию Якоби.

E.V. ANTONOVA, N.A. KUDRYASHOV

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

SOLUTION IN THE FORM OF PERIODIC AND SINGLE WAVES OF THE GENERALIZED SCHROEDINGER EQUATION

In this paper, the generalized nonlinear Schrödinger equation taking into account the third order is considered. This is a nonlinear partial differential equation which can be used for describing pulses in optical fibers. The Cauchy problem for it is not solved by the inverse scattering transform; the solution of the equation is considered taking the travelling wave into account. Taking into account the variables of the traveling wave, we obtain a system of differential equations for the imaginary and real parts, respectively. An analytical solution is found, expressed in terms of the Jacobi elliptic function.

В настоящее время известен ряд дифференциальных уравнений, которые используются при описании распространения импульса в оптическом волокне[1,2,3,4]. В работе рассмотрено обобщенное нелинейное уравнение Шредингера с учетом производной третьего порядка, имеющее вид

$$q_t + ib_1 q_{xx} + ib_2 q|q^2| + b_3 q_{xxx} + b_4 (q|q^2|)_x + b_5 q(|q^2|)_x = 0, \quad (1)$$

где $q(x, t)$ -комплексная функция, характеризующая огибающую волнового пакета, $(b_n, n = 1-5)$ - параметры уравнения, связанные с групповой скоростью, фазовой самомодуляцией, дисперсией третьего порядка и собственным частотным сдвигом, x - координата, t - время.

Цель работы найти решения обобщенного нелинейного уравнения Шредингера в виде периодических и уединенных волн.

Обобщенное нелинейное уравнение Шредингера (1) рассмотрено, используя переменные бегущей волны. Показано, что система уравнений для мнимой и действительной части может быть совместной. Система уравнений принимает вид

$$\begin{cases} y_{zz} + \frac{b_4 k + b_2}{3b_3 k + b_1} y^3 + \frac{-b_3 k^3 - b_1 k^2 - \omega}{3b_3 k + b_1} y = 0 \\ y_{zz} + \frac{b_4 + \frac{2}{3}b_5}{b_3} y^3 + \frac{-3b_3 k^2 - 2b_1 k - C_0}{b_3} y = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Чтобы уравнения совпадали, были приравнены коэффициенты при y и y^3 . Следовательно, можно решать любое уравнение системы. После преобразований получили уравнение

$$y_z^2 + K_1 y^4 - K_2 y^2 + C_2 = 0, \quad (3)$$

где $K_1 = \frac{b_4 k + b_2}{3b_3 k + b_1}$, $K_2 = \frac{b_3 k^3 + b_1 k^2 + \omega}{3b_3 k + b_1}$, C_2 -константа интегрирования, выражаются через первое уравнение системы (2).

Решение уравнения найдено через эллиптическую функцию Якоби. Проведен анализ возможных решений с учетом значений коэффициентов K_1 , K_2 и C_2 . Рассмотрены 8 случаев. Получены периодические и уединенные волны уравнения.

Таким образом, в работе получены ограничения на коэффициенты уравнения, для которого находятся аналитические решение. Показано, что уравнение имеет точные решения в виде периодических и уединенных волн выраженные через эллиптическую и экспоненциальную функцию. Построены графики решений при некоторых значениях коэффициентов уравнения.

Список литературы

1. Whitham J. Linear and nonlinear waves. // Mir, 1977. - p. 574-578. — 622. — 622 p.
2. Kudryashov N.A. Optical solitons of mathematical model with arbitrary refractive index. // Optik, 2020. V. 224, 165391.
3. Kudryashov N.A. On traveling wave solutions of the Kundu -- Eckhaus equation. // Optik, 2020. V. 224, 165500.
4. Kudryashov N.A., Antonova E.V. Solitary waves of equation for propagation pulse with power nonlinearities. // Optik, 2020. V. 217, 164881.

И.Н. АРАПОВ, Ю.Н. БУХАРЕВ

Саровский физико-технический институт, Саров, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ АЛГОРИТМОВ И МОДЕЛЕЙ ПП ЛОГОС НА ПРИМЕРАХ РЕШЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ЗАДАЧ УДАРА СТЕРЖНЕВЫХ УДАРНИКОВ ПО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПРЕГРАДАМ

Проведена верификация алгоритмов и моделей ПП ЛОГОС на примере решения нескольких задач удара стержневыми ударниками по металлическим прочным преградам. В ходе работы получены удовлетворительные результаты работоспособности пакета программ ЛОГОС.

I.N. ARAPOV, Y.N. BYKHAREV

Sarov Physics and Technical Institute, Sarov, Russia

RESULTS OF VERIFICATION OF ALGORITHMS AND MODELS OF LOGOSSOFTWARE PACKAGE ON EXAMPLES OF SOLVING SEVERAL PROBLEMS OF ROD IMPACT ON METAL OBSTACLES

Verification of algorithms and models of PP LOGOS was carried out on the example of solving several problems of impact by rod strikers on metal strong barriers. In the course of the work, satisfactory results were obtained for the LOGOS software package.

Многофункциональный пакет прикладных программ ЛОГОС [1], разрабатываемый в настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ, всё более широко используется в инженерной практике, в том числе, и для решения задач воздействия высокоскоростных ударников на прочные конструкции. В последние годы проведено существенное совершенствование вычислительных алгоритмов и моделей материалов ПП ЛОГОС, позволившее значительно расширить его функциональные возможности численного моделирования соударений твёрдых тел в широком диапазоне скоростей. С учётом сложности процессов динамического деформирования и разрушения материалов в этих расчётах возрастает актуальность систематизированного расширения массивов верификационных данных для различных классов задач удара, решаемых с помощью ПП ЛОГОС.

В данной работе с помощью ПП ЛОГОС версии 2020 года проведено решение 16-и вариантов 3-х типов задач соударения стержневых ударников, выполненных из стальных и вольфрамовых сплавов, по прочным стальным преградам в диапазоне скоростей от 180 до 2100 м/с. Стальные ударники имели массу 197 г, длину 74 – 80 мм, плоскую или полусферическую форму носовой части. Начальные скорости V_0 их удара составляли от 180 до 452 м/с направлены по оси ударника и по нормали к стальным преградам толщиной 12 мм. Масса вольфрамовых ударников была 11 г при длине около 50 мм; их скорости $V_0 = 1250 – 2100$ м/с. В большинстве вариантов удары были также по нормали к

преградам, имевшим толщину от 29 до 120 мм; в одном варианте ось ударника была отклонена от вектора скорости на угол атаки, равный 32° .

Указанные параметры ударников и преград в расчётах были приняты такими же, как в работах [2–5], содержащих как опытные данные по ряду параметров, так и результаты численного моделирования по программам LS-DYNA, СТН.

Результаты верификации показали, что реализованные в последней версии ПП ЛОГОС вычислительные алгоритмы можно успешно использовать для решения рассмотренного класса задач воздействия стержневых металлических ударников на прочные металлические элементы конструкций.

Вместе с этим, сформулированы предложения по дальнейшему совершенствованию алгоритмов и моделей ПП ЛОГОС и повышения уровня его функциональных возможностей до уровней распространенных коммерческих пакетов программ. В частности, отмечена целесообразность дополнительных исследований по уменьшению погрешностей расчётов при скоростях удара, близких к баллистическому пределу.

Список литературы

1. Дьянов Д.Ю., Спиридонов И.Ф., Циберев К.В., Казанцев А.В. и др. // ВАНТ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, сер. Математическое моделирование физических процессов. Саров. 2018. Вып. 1. С. 3-14.
2. Borvik T., Langseth M., Hopperstad O.S., Malo K.A. // International Journal of Impact Engineering. 2002. Vol. 27, No. 1. P. 19-35.
3. Borvik T., Hopperstad O.S., Berstad T., Langseth M. // International Journal of Impact Engineering. 2002. Vol. 27, No. 1. P. 37-64.
4. Anderson C.E., Hohler V., Walker J.D., Stilp A.J. Time-resolved penetration of long rods into steel targets // International Journal of Impact Engineering. 1995. Vol. 16, No. 1. P. 1-18.
5. Бухарев Ю.Н., Жуков В.И. //ФГВ. 1995. Т. 31, №3. С. 104-109.

С.П.БАУТИН, Ю.В.НИКОЛАЕВ

*Снежинский физико-технический институт Национальный исследовательский
ядерный университет МИФИ, Снежинск, Россия*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОГО СЖАТИЯ ГАЗА ИЗ ПОКОЯ В ПОКОЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК

Получено численное решение задачи сильного сжатия газа из покоя в покой, когда покоящийся газ с плотностью 1 сжимается в покоящийся газ с плотностью 10000. Сжатие выполняется без ударных волн, эффективным с точки зрения энергозатрат способом: энергия сжатия используется только на сжатие газа, и не тратится на его разгон. Расчет выполнен методом характеристик. Затем значения газодинамических параметров в узлах характеристической сетки перенесены на узлы равномерной сетки. Для этого использован метод ближайших соседей.

S.P. BAUTIN, I.U. V. NIKOLAEV

*Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University
MEPhI, Snezhinsk, Russia*

STRONG COMPRESSION NUMERICAL SIMULATION OF A GAS FROM REST TO REST USING VARIOUS COMPUTATIONAL GRIDS

A numerical solution is obtained for the problem of strong compression of a gas from rest with a density of 1 to rest with a density of 10000. Compression is performed without shock waves, in an efficient way from the point of view of energy input: compression energy is used only to compress the gas, and is not spent on its acceleration. Calculation is made by the method of characteristics. Then values of gas-dynamic parameters in characteristic grid nodes are transferred to nodes of the uniform grid. For this, the nearest neighbor method is used.

Ставится следующая задача о сжатии газа из покоя в покой. В начальный момент времени газ однороден с плотностью 1, а скорость газа равна 0. Это состояние 1 газа. Состояние газа в финальный момент времени такое: газ однороден, его плотность равна 10000; при этом газ покоится. Это состояние 2. Требуется найти течения газа, возникающие при безударном переходе (сжатии) одномерного газового слоя из состояния 1 в состояние 2. Течения газа определяются решениями системы уравнений газовой динамики.

Моделирование сильного сжатия газа [1] требуется при решении проблемы управляемого термоядерного синтеза. Полученное численное решение наиболее эффективно с точки зрения энергозатрат: энергия сжатия используется только на сжатие газа и не тратится на его разгон.

В основу расчета положена модификация метод характеристик [2], позволившая восстанавливать значения газодинамических параметров в узлах характеристической сетки. При использовании различных программных

реализаций расчета сильного сжатия газа [3] возникает задача об устойчивом переходе с одних расчетных сеток на другие [4]. Для перехода от характеристической сетки к равномерной использован «метод ближайших соседей», в котором значение газодинамических параметров в каждой точке рассчитывается как взвешенное значение ближайших к ней точек с известными значениями.

Работа алгоритма проверена сравнением полученных значений с значениями из ранее полученного численного решения. Подтвержден вывод, что алгоритм реализует расчет значений газодинамических параметров в точках произвольных сеток.

Список литературы

1. Баутин С.П. Математическое моделирование сильного сжатия газа. // Новосибирск: Наука, 2007. 312 с.
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. Долголева Г.В., Забродин А.В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия. // Москва: Физматлит, 2004. 72 с.
4. Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Козелков А.С., Тетерина И.В. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках. // Москва: Физматлит, 2015. 415с.

С.П. БАУТИН, Е.И. ПОНЬКИН

*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального
исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Россия*

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОЙНОЙ ВОЛНЫ СУЧКОВА, ДАЮЩИЕ ОПИСАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МИШЕНЬ

Двойная волна В.А. Сучкова (ДВС) - автомодельное решение системы уравнений газовой динамики (СУГД), описывающее при $t \geq 0$ истечение политропного газа в вакуум с косою стенки, а при $t \leq 0$ – неограниченное сжатие газа, первоначально заполнявшего призматический объем. Рассмотрены газодинамические характеристики ДВС, описывающей течения при двух способах воздействия на мишень для управляемого термоядерного синтеза (УТС).

S.P. BAUTIN, E.I. PONKIN

*Snezhinsk Engineering and Technological Institute of National Research Nuclear
University MEPHI, Snezhinsk, Russia*

GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SUCHKOV'S DOUBLE WAVE, GIVING A DESCRIPTION OF VARIOUS METHODS OF IMPACT ON A TARGET

Double wave V.A. Suchkova (DWS) is a self-similar solution of the system of equations of gas dynamics (LPGD), which describes the outflow of a polytropic gas into vacuum from an oblique wall, and at, an unlimited compression of the gas that initially filled the prismatic volume. The gas-dynamic characteristics of a double wave describing flows with two methods of action on a target for controlled thermonuclear fusion are considered (TFC).

В работе [1] для автомодельного решения СУГД, описывающего истечение политропного газа в вакуум с косою стенки и сжатие специальной призматической мишени в согласованном случае, когда выполняется соотношение

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = (\gamma + 1)/(3 - \gamma), \quad (1)$$

здесь α – угол наклона косою стенки, γ – показатель политропы газа, построен закон движения точек газа (см. формулу (2)).

Выражение (2) позволяет описать движение непроницаемого поршня в области течения сжатия ДВС – первый способ воздействия на мишень. Из анализа газодинамических характеристик ДВС показано, что если газ в области ДВС сжимать непроницаемым поршнем, то вне зависимости от начальной геометрической конфигурации он с течением времени начинает выгибаться в сторону косою стенки. В окрестности крайней точки поршня, в которой он касается косою стенки, возникает область большой локальной кумуляции. Эта область и параметры кумуляции тем больше, чем раньше поверхность

непроницаемого поршня будет наклонена к косой стенке под острым углом (см. рис. 1, а).

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \frac{x_0 + \sqrt{\beta}y_0 + t_0/\varkappa}{1 + \beta} \left(\frac{t}{t_0}\right)^\delta - \frac{1 + \sqrt{\beta}\varkappa \left(y_0/t_0 - \sqrt{\beta}x_0/t_0\right)}{1 + \beta} \frac{t}{\varkappa}; \\
 y(t) &= \frac{\left(x_0 + \sqrt{\beta}y_0 + t_0/\varkappa\right)\sqrt{\beta}}{1 + \beta} \left(\frac{t}{t_0}\right)^\delta + \frac{\varkappa \left(y_0/t_0 - \sqrt{\beta}x_0/t_0\right) - \sqrt{\beta}}{1 + \beta} \frac{t}{\varkappa}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Здесь t_0, x_0, y_0 – начальные данные для конкретной траектории, $\varkappa = (\gamma - 1)/2$; $\beta = (\gamma + 1)/(3 - \gamma)$; $\delta = (1 - \varkappa)/(1 + \varkappa)$.

Для второго способа воздействия на мишень – заданным внешним давлением – закон движения точек поверхности проницаемого поршня имеет вид (2), в котором

$$\delta = 1/(1 + \varkappa).
 \tag{3}$$

В этом случае, когда газ в области ДВС сжимается проницаемым поршнем с заданным давлением, равным давлению на поршне, сжимающего центрированную волну, то линия этого поршня всегда перпендикулярна косой стенке и эффекта большой локальной кумуляции не наблюдается (см. рис. 1,б).

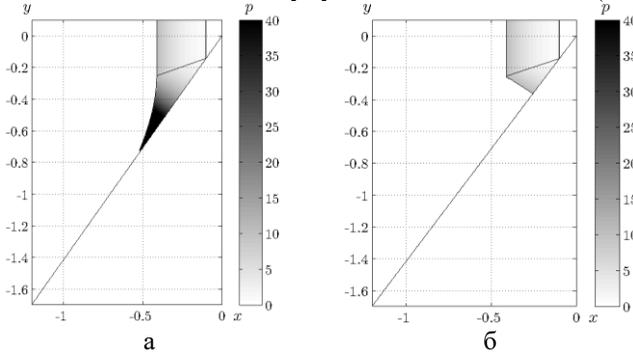


Рис. 1.

Список литературы

1. Баутин С. П., Понькин Е. И. Автомодельные решения задачи об истечении политропного газа в вакуум с косой стенкой. // Прикладная механика и техническая физика. 2021, т. 62, № 1. С.32 – 42.

К.В. БРУШЛИНСКИЙ, Е.В. СТЕПИН

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

О ПОДХОДАХ К ИССЛЕДОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ-ГАЛАТЕЯХ

Перспективный класс магнитных ловушек-галатей с погружёнными в плазменный объём проводниками является актуальным объектом исследований в силу широкого разнообразия возможных магнитоплазменных конфигураций в этих устройствах, что позволяет рассчитывать на более эффективное удержание в решении задачи управляемого термоядерного синтеза. В докладе представлены результаты численных исследований равновесных конфигураций и их устойчивости в магнитных ловушках «Галатей-Пояс» с двумя токонесящими проводниками.

K. V. BRUSHLINSKII, E. V. STEPIN

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

ON APPROACHES TO STABILITY INVESTIGATION OF EQUILIBRIUM PLASMA CONFIGURATIONS IN MAGNETIC GALATHEA-TRAPS

The promising type of magnetic galathea-traps with current-carrying conductors immersed into the plasma is an actual topic of investigations due to wide variety of possible magnetoplasma configurations in them. It allows to expect more effective confinement in thermonuclear fusion problem solving. In the lecture, the results of numerical researchers of equilibrium plasma configurations and the approaches to their stability studies in magnetic traps «Galathea-Belt» with two current-carrying conductors are considered.

Установки для магнитного удержания высокотемпературной плазмы являются важным объектом исследований и технологических разработок в связи с перспективой овладеть энергией, выделяемой в процессе термоядерного синтеза лёгких элементов. Одной из основных задач при создании этих устройств является организация магнитного поля таким образом, чтобы не позволить горячей плазме соприкасаться с элементами установки во избежание их разрушения. Помимо традиционных токамаков и стеллараторов интерес для исследований представляет перспективный класс ловушек-галатей [1], в которых удерживающее магнитное поле создаётся токонесящими проводниками, которые погружены в плазменный объём и при этом с ним не соприкасаются. Численное моделирование играет существенную роль в разработках этих устройств, позволяя определить основные качественные и количественные тенденции в характере протекающих в них процессов [2].

Основные направления исследования конфигураций в ловушках и соответствующих численных моделей сводятся к описанию их возможных равновесных состояний и к изучению их устойчивости относительно хотя бы малых, но достаточно произвольных возмущений.

В докладе представлены результаты исследований двумерных равновесных магнитоплазменных конфигураций в распрямлённом для простоты в цилиндр аналоге тороидальной магнитной ловушки «Галатея-Пояса» с двумя погружёнными в плазму токнесущими прямыми проводниками. Равновесные конфигурации (пример расчёта представлен на рис. 1) описываются плазмостатической моделью с эллиптическим уравнением Грэда-Шафранова для функции магнитного потока и заданными граничными условиями [3].

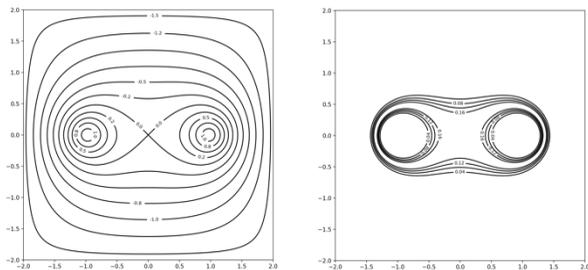


Рис. 1. Пример равновесных конфигураций магнитного поля (слева) и давления плазмы (справа) в ловушке «Галатея-Пояс».

Постановка задачи об их устойчивости сводится к двумерным задачам для отдельных гармоник по координате z . Указаны возможные подходы к её решению, получен критерий устойчивости. Кроме того, обращено внимание на более простые промежуточные обстоятельства, имеющие отношение к устойчивости. Обсуждаемые результаты более подробно представлены в [4].

Список литературы

1. Морозов А.И. // Физ. плазмы. 1992. Т. 18, Вып. 3, С. 305-316.
2. Брушлинский К.В. Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики. // 3. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 200 с.
3. Шафранов В.Д. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33, Вып. 3(9). С. 710-722.
4. Брушлинский К.В., Степин Е.В. // Дифф. ур. 2021 (в печати).

В.С. ДРЮМА

Институт математики и информатики ИМИ, Кишинев, Молдова

ОБ ИНТЕГРИРОВАНИИ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В ПЕРЕМЕННЫХ ЛАГРАНЖА

Построены примеры точных решений системы уравнений Навье-Стокса в лагранжевых переменных, описывающей движения нестационарных течений несжимаемой вязкой жидкости. На основе полученных решений разработан подход к описанию перехода жидкости от ламинарного к турбулентному течению через странный аттрактор в пространстве состояний системы..

V.S. DRYUMA

Institute of Mathematics and Informatics IMI, Kishinev, Moldova

ON THE INTEGRATION OF THE NAVIER-STOKES EQUATIONS IN LAGRANGE VARIABLES

Examples of exact solutions of the Navier-Stokes equations in Lagrange variables, which describe non stationary motions of a viscous and in-compressible fluid are obtained. With the help of such solutions the mechanism of transition from a laminar flow of liquid to a turbulent one, by using the reductions of equations under study to finite-dimensional dynamical systems with a strange attractor in the space of states was developed.

Уравнения трехмерных течений несжимаемой жидкости в лагранжевых переменных имеют вид:

$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} = -[X^j, X^k, P] + \mu \left[X^2, X^3, \left[X^2, X^3, \frac{dx^i}{dt} \right] \right] + \mu \left[X^3, X^1, \left[X^3, X^1, \frac{dx^i}{dt} \right] \right] + \mu \left[X^1, X^2, \left[X^1, X^2, \frac{dx^i}{dt} \right] \right], \quad (1)$$

$$[X^1, X^2, X^3] = \frac{dX}{dx} \frac{dY}{dy} \frac{dZ}{dz} - \frac{dX}{dx} \frac{dY}{dz} \frac{dZ}{dy} - \frac{dX}{dy} \frac{dY}{dx} \frac{dZ}{dz} + \frac{dX}{dz} \frac{dY}{dx} \frac{dZ}{dy} + \frac{dX}{dy} \frac{dY}{dz} \frac{dZ}{dx} - \frac{dX}{dz} \frac{dY}{dy} \frac{dZ}{dx} = 1, \quad (2)$$

где $P=P(x,y,z,t)$ – давление, X^i - координаты частиц жидкости, $i=1,2,3$, μ - коэффициент вязкости.

В докладе будут приведены примеры точных решений системы уравнений, в конструкции которых основная роль принадлежит условию несжимаемости жидкости. На этом пути открывается возможность привлечения результатов теории полиномиальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx^i}{dt} = \sum a_{kj}^i x^k x^j \quad (3)$$

с параметрами a_{kj}^i и, обладающими, как предельными циклами, так и аттракторами странного типа, для описания свойств полной системы уравнений (1) и (2).

В качестве альтернативного подхода к изучению свойств системы уравнений (1) предлагается использовать теорию инвариантов Лиувилля-Трессе-Картана ОДУ второго порядка вида

$$Y'' + a_1(Y')^3 + a_2(Y')^2 + a_3(Y') + a_4 = 0 \tag{4}$$

с коэффициентами $a_i = a_i(X, Y)$ и эквивалентного системе (3).

Теорема. Простейшее решение лагранжевых уравнений Навье-Стокса вида

$$\begin{aligned} X(x, y, z, t) &= \delta x + \alpha y + \varepsilon z, & Y(x, y, z, t) &= \kappa x + \kappa y + \kappa z, \\ Z(x, y, z, t) &= x + _F1(z, t)(y - x) \end{aligned}$$

при определенных значениях параметров приводит к уравнению в ч.пр. относительно функции $_F1(z, t)$, которое допускает дальнейшую редукцию к обыкновенному уравнению вида (4), эквивалентному системе (3) и в которой, при специальном выборе параметров существует странный аттрактор типа Лоренца.

Список литературы

1. Dryuma V.S. On equations of incompressible liquids in Lagrangian variables. // International Conference. Современные проблемы механики сплошной среды, Тезисы докладов, МИАН, Москва, 13-15 ноября, 2017 г., с.14-16.
2. Dryuma V.S. Homogeneous extensions of the first order ODE's. // International Conference "Algebraic Topology and Abelean functions". Moscow, 18-22 June, Steklov Mathematical Institute of RAS, Abstracts, 2013, с. 78-79.
3. Дрюма В.С. Геометрические свойства уравнений Навье-Стокса и их приложения. // VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2020», Сборник научных трудов. НИЯУ, МИФИ, Москва, 11-14 Февраля с. 82-83.

**V.V. ИВАНОВ^{1,2}, В.В. ИВАНОВ^{1,2}, А.В. КРЯНЕВ²,
А.С. ПРИКАЗЧИКОВА², И.И. ТАТАРИНОВ^{1,3}**

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия, ²Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия, ³АО «Лаборатория Касперского», Москва, Россия

К ВОПРОСУ ОБ ИМИТАЦИИ DDoS АТАКИ В МАГИСТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ

В настоящей работе обсуждается возможность обнаружения DDoS атаки с помощью измерений интернет-трафика, регистрируемого на магистральном канале. Результаты выполненных исследований показали, что при имитации DDoS-атаки нами не наблюдается ожидаемого нарушения логнормального закона, которым с высокой точностью аппроксимируются указанные измерения. Для проведения детального анализа динамики трафика при DDoS-атаке на сетевой ресурс необходима организация реальной, контролируемой атаки на конкретный сетевой ресурс.

**V.V. IVANOV^{1,2}, V.V. IVANOV^{1,2}, A.V. KRYANEV²,
A.S. PRIKAZCHIKOVA², I.I. TATARINOV^{1,3}**

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, ²National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia, ³AO "KasperskyLab", Moscow, Russia

ON THE SUBJECT OF SIMULATING A DDoS ATTACK IN A BACKBONE CHANNEL

In this paper we discuss the possibility of detection a DDoS attack using measurements of internet traffic registered on the trunk channel. The results of the studies performed showed that when simulating a DDoS attack, we did not observe the expected violation of the lognormal law, which approximates the measurement data with high accuracy. For a detailed analysis of the traffic during a DDoS attack on a network resource, it is necessary to organize a real, controlled attack on a specific network resource.

Ранее нами было показано, что как для локальной сети среднего размера [1], так и для магистрального канала [2] формируются статистические распределения (в частности плотность вероятности распределения (ПВР) интенсивности сетевого трафика и ПВР скорости передачи сетевых пакетов), которые с высокой точностью аппроксимируются логнормальным распределением или несколькими логнормальными распределениями. Тем не менее, возможны изменения сетевой среды распределения информационного потока при которых логнормальный закон не наблюдается. В частности, в случае проведения DDoS-атаки на сетевую инфраструктуру наблюдалось разрушение логнормального закона. Таким образом, одним из подходов по обнаружению DDoS-атаки до момента нарушения работоспособности сетевой системы может служить

мониторинг характеристик сетевого трафика с целью обнаружения "разрушения" логнормального закона, которым аппроксимируются соответствующие ПВР.

Для проверки указанной гипотезы требуется выполнить контролируемую DDoS-атаку или смитировать таковую путём моделирования её с использованием данных о сетевом трафике, полученном при обычной работе сетевого канала. Выполненная имитация DDOS атаки заключалась в формировании сетевого трафика, интенсивность и/или скорость передачи сетевых пакетов которого находились бы значительное время близко к уровню, ограниченному пропускной способностью сетевого канала или производительностью сетевого оборудования. Для этой цели из полученного ранее стандартного сетевого трафика выбирались сетевые пакеты в интервалах времени, характеризующихся близкой к максимальной пропускной способностью сетевого канала и/или производительностью сетевого оборудования и формировался новый сетевой трафик, имитирующий DDoS-атаку за счёт насыщения сетевого канала данными или сетевого оборудования запросами.

В результате анализа сформированного трафика в числе прочего были получены следующие результаты: 1) ПВР интенсивности сетевого трафика и ПВР скорости передачи сетевых пакетов, полученных для реального трафика, и трафика, имитирующего DDoS-атаку, с высокой точностью аппроксимируются логнормальным законом; 2) для сетевых пакетов, передаваемых в дуплексном режиме, у ПВР интенсивности сетевого трафика, имитирующего DDoS-атаку, исчезает, или же становится слабо выраженным второй пик, который был ярко выражен в ПВР интенсивности сетевого трафика для реального сетевого трафика), аналогичное поведение наблюдается для ПВР скорости передачи сетевых пакетов; 3) имитация DDoS-атаки не позволила достичь "разрушения" логнормального закона.

Список литературы

1. Antoninou I., Ivanov V.V., Ivanov Valery V., and Zrellov P.V. On the Log-Normal Distribution of Network Traffic. // *Physica D* 167 (2002) 72-85.

2. Zrellov P.V., Ivanov Valery V., Ivanov Victor V., Kryukov Yu.A., Tatarinov I.I. Study of Internet-Traffic Features in the Trunk Channel. // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 289-299.

В.Л. КАМЫНИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

**ОБ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСЯЩЕГО ОТ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ МЛАДШЕГ
КОЭФФИЦИЕНТА В ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ СО
СЛАБЫМ ВЫРОЖДЕНИЕМ**

Доказаны теоремы существования и единственности решений обратных задач определения зависящего от x коэффициента поглощения в вырождающемся параболическом уравнении с двумя независимыми переменными. В качестве дополнительного условия задается условие интегрального наблюдения. Неизвестный коэффициент поглощения ищется в классе неотрицательных ограниченных функций. Приведены примеры обратных задач, для которых выполняются условия доказанных в работе теорем

V.L. KAMYNIN

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

**ON INVERSE PROBLEMS OF DETERMINING THE SPACE-
DEPENDENT LOWER COEFFICIENT IN WEAKLY
DEGENERATING PARABOLIC EQUATION**

We prove existence and uniqueness theorems for inverse problems of determining the space-dependent absorption coefficient in degenerating parabolic equation with two independent variables The additional condition is given in the form of integral observation The unknown absorption coefficient is found in the class of nonnegative bounded functions. Examples of inverse problems are given for which the conditions of the theorems proved are satisfied.

Изучается существование и единственность обобщенного решения $\{u(t, x), \gamma(x)\}$ обратной задачи для параболического уравнения

$$u_t + a(x)u_{xx} + b(x)u_x + c(t, x)u + \gamma(x)u = f(t, x), \quad (t, x) \in Q; \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$u(0, x) = u_0(x), \quad x \in [0, l]; \quad u(t, 0) = \mu_1(t), u(t, l) = \mu_2(t), \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

и дополнительным условием интегрального наблюдения

$$\int_0^T u(t, x) \chi(t) dt = \varphi(x), \quad x \in [0, l], \quad (3)$$

а также существование и единственность обобщенного решения $\{u(t, x), \gamma(x)\}$ обратной задачи для уравнения

$$\rho(t, x)u_t + u_{xx} + b(x)u_x + c(t, x)u + \gamma(x)u = f(t, x), \quad (t, x) \in Q; \quad (4)$$

с краевыми условиями (2) и дополнительным условием (3). В указанных задачах $(t, x) \in Q \equiv [0, T] \times [0, l]$.

Особенностью постановки обратных задач является предположение о том, что уравнения (1) и (4) являются вырождающимися, а именно, для уравнения (1) выполнено условие

$$0 \leq a(x) \leq a_1, 1/a(x) \in L_q(0, l), q > 1;$$

а для уравнения (4) условие

$$0 \leq \rho(t, x) \leq \rho_1, 1/\rho(t, x) \in L_q(Q), q > 1.$$

Установлены достаточные условия, при которых решения обратных задач (1)-(3) и (4),(2),(3) существуют и единственны. 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 аналогичные результаты восстановления правой части уравнений (1) и (4) при дополнительном условии (3) ранее установлены 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

УЕДИНЕННЫЕ ВОЛНЫ, ОПИСЫВАЕМЫЕ СИСТЕМОЙ УРАВНЕНИЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА ДЛЯ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ

Рассматривается система нелинейных уравнений четвертого порядка, описывающая распространение волн в среде с Брэгговской решеткой. Найдены точные решения в форме уединенных волн.

K.V. KAN, N.A. KUDRYASHOV

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

SOLITARY WAVES DESCRIBED BY A FOURTH-ORDER SYSTEM OF EQUATIONS FOR BRAGG GRATINGS

A fourth-order system of nonlinear equations describing wave propagation in Bragg gratings medium is considered. Exact solutions in the form of solitary waves are found.

Рассматривается система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных четвертого порядка в среде с Брэгговской решеткой, соответствующая уравнению (см. [1]):

$$iu_t + \alpha u_{xx} + i\beta u_{xxx} + \delta u_{xxxx} + (h_1|u|_{xx}^n + h_2|v|_{xx}^n + g_1|u|_{xx}^{2n} + g_2|v|_{xx}^{2n})u + (a_1|u|^n + a_2|v|^n + b_1|u|^{2n} + b_2|v|^{2n} + c_1|u|^{3n} + c_2|v|^{3n} + d_1|u|^{4n} + d_2|v|^{4n})u + sv = 0, \quad (1)$$

$$iv_t + \alpha v_{xx} + i\beta v_{xxx} + \delta v_{xxxx} + (h_3|u|_{xx}^n + h_4|v|_{xx}^n + g_3|u|_{xx}^{2n} + g_4|v|_{xx}^{2n})v + (a_3|u|^n + a_4|v|^n + b_3|u|^{2n} + b_4|v|^{2n} + c_3|u|^{3n} + c_4|v|^{3n} + d_3|u|^{4n} + d_4|v|^{4n})v + ru = 0. \quad (2)$$

Ранее на Брэгговской решетке также рассматривалась система нелинейных дифференциальных уравнений шестого порядка [2].

Задача Коши для системы уравнений (1)-(2) не решается методом обратной задачи рассеяния, поэтому с помощью переменных бегущей волны, система уравнений (1)-(2) сводится к системе четырех обыкновенных дифференциальных уравнений, соответствующих действительным и мнимым частям. Получены условия совместности системы уравнений и определены ограничения на параметры. С учетом полученных ограничений найдены точные решения в форме уединенных волн [1]:

$$y_1(z) = D_1 \left(\frac{4E e^{n(z-z_0)\sqrt{E}}}{2Ae^{n(z-z_0)\sqrt{E}} + (A^2 + 4BE)e^{2(z-z_0)n\sqrt{E}} + 1} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3)$$

$$y_2(z) = D_2 \left(\frac{4E e^{n(z-z_0)\sqrt{E}}}{2Ae^{n(z-z_0)\sqrt{E}} + (A^2 + 4BE)e^{2(z-z_0)n\sqrt{E}} + 1} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (4)$$

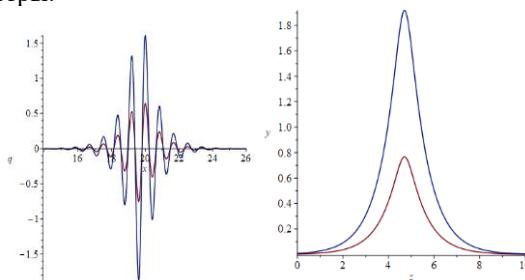
Решение системы уравнений (1)-(2) записывается в следующем виде:

$$u(x, t) = y_1(z) e^{i(kx - \omega t)}, \quad (5)$$

$$v(x, t) = y_2(z) e^{i(kx - \omega t)}, \quad (6)$$

где $z = x - C_0 t$.

Ниже приведены графики полученных решений с учетом найденных ограничений на параметры.



(а)

(б)

Рис. 1. Графики уединенных волн $y_1(z)$ и $y_2(z)$ (а) и действительных частей $u(x, t)$ и $v(x, t)$ (б) при $t = 15, A = 5, B = 2.4, E = 1.5, n = 5, C_0 = 1, k = 7.5, \delta_2 = 1, D_1 = 1, D_2 = 2.5, s = 2, z_0 = 5$

Проанализировав поведение графиков функций при варьировании параметров, можно отметить, что наибольшее влияние на решение оказывают параметры n, A и E .

Список литературы

1. Kudryashov, N.A. // Regular and Chaotic Dynamics, 25(6):537–543, 2020.
2. Кан, К.В., Кудряшов, Н.А. // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ 9.3 (2020): 210-216.

В.К. КОЗЛОВ, М.А. ЧМЫХОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ SIMPLE И PIMPLE ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ

Рассматривается конвективное движения в прямоугольной области, температура нижней поверхности которой больше верхней. Для моделирования используются два встроенных и один модифицированный решатель. Авторский решатель и один из встроенных реализуют SIMPLE алгоритм, второй встроенный решатель основан на PIMPLE алгоритме. Решатели использовались при моделировании конвекционного движения в горизонтальной области для четыре видов начальных условий. Получены различные варианты конвекционного движения. Противоречий в результатах решателей, реализующих SIMPLE алгоритм, получено не было.

V.K. KOZLOV, M.A. CHMYKHOV

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

USING THE SIMPLE AND PIMPLE ALGORITHMS FOR NUMERICAL MODELING OF CONVECTION MOTION

Convective motion in a rectangular region is considered. Temperature of the lower surface is higher than the upper one. Two built-in and original solvers are used for modeling. The original solver and one of the built-in ones implement the SIMPLE algorithm, the second built-in solver is based on the PIMPLE algorithm. Solvers are used to simulate convective motion in the horizontal region for four types of initial conditions. Various variants of convection motion are obtained. There were no contradictions in the results of solvers based on the SIMPLE algorithm.

Рассматривается задача конвекционного движения в прямоугольной области по лесилтяжести. Движение жидкости описывается системой уравнений в приближении Буссинеска [1]. Рассматриваемая область представляет собой плоский прямоугольный слой жидкости с отношением сторон $\frac{h}{l} = \frac{7}{5}$, температура нижней границы которого большей верхней.

Математическое моделирование проводилось с использованием платформы OpenFOAM. Использовались решатели buoyantBoussinesqSimpleFoam (основанный на алгоритме SIMPLE), buoyantBoussinesqPimpleFoam (основанный на алгоритме PIMPLE) и авторский решатель [2], представляющий собой модификацию решателя isoFoam. Для визуализации результатов использовался пакет ParaView.

Температура нижней поверхности рассматриваемой области принимается как T_h , а верхней – T_c и вводится средняя температура $T_{avg} =$

$\frac{T_h+T_c}{2}$. Рассматриваются 4 вида начальных условий: когда начальная температура внутри области одинакова - T_{start} и она меньше, чем T_{avg} ; когда начальная температура внутри области $T_{start} = T_{avg}$; когда начальная температура внутри области $T_{start} > T_{avg}$; и когда начальная температура внутри области равномерно распределена от теплой границе к холодной.

Для всех четырех случаев при использовании решателей, реализующих алгоритм SIMPLE, получаются разные варианты движения. При $T_{start} = T_{avg}$ получается режим конвективного движения со сменой направлений течения жидкости. При $T_{start} > T_{avg}$ и $T_{start} < T_{avg}$ получен установившийся режим конвективного движения, течение жидкости направлено в противоположные стороны. Для случая равномерного распределения температуры конвективного движения на рассматриваемом временном участке получено не было.

При использовании решателя, реализующего алгоритм PIMPLE, для начальных условий $T_{start} = T_{avg}$, $T_{start} > T_{avg}$ и $T_{start} < T_{avg}$ получен общий режим движения – установившийся режим конвективного движения. Для случая равномерного распределения температуры получен режим течения со сменой направления.

Проведена проверка на численную сходимость.

Список литературы

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. // М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1972, 392 с.
2. Kozlov, V.K., Chmykhov, M.A. On numerical modeling of natural convection based on the OpenFOAM solver. // (2020) Journal of Physics: Conference Series, vol. 1686 (1), 012032.

О.К.КРОЙТОР, М.Д. МАЛЫХ

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

В докладе обсуждаются поверхностные электромагнитные волны, которые распространяются вдоль границы изотропных и анизотропных сред. Мы показываем, как эти волны можно исследовать в системе компьютерной алгебры Sage.

О.К. КРОЙТОР, M.D. MALYKH

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

SURFACE ELECTROMAGNETIC WAVES

The report discusses surface electromagnetic waves that propagate along the border of isotropic and anisotropic media. We show how these waves can be explored in the Sage computer algebra system.

В 1980-х годах были открыты поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела двух диэлектриков без потерь [1,2]. В [3,4] были получены вручную первые аналитические выражения для решений, представляющих собой волны, распространяющиеся вдоль границы раздела анизотропа с диэлектрической проницаемостью

$$\epsilon = (\epsilon_o, \epsilon_o, \epsilon_e)$$

и изотропа с постоянной диэлектрической проницаемостью ϵ . Пусть для определенности границей раздела служит плоскость $x = 0$.

Введем обозначения: ω - круговая частота волны, $k_0 = \omega/c$ - волновое число, $\vec{k}_\perp = (0, k_y, k_z)$ - ее волновой вектор, a_o, a_e - амплитуда двух парциальных волн, а положительные числа p_o, p_e характеризуют скорость убывания волны в толще анизотропа. микроскопа.

Поле в анизотропе ($x < 0$) будем искать в виде

$$\begin{aligned}\vec{E} &= (a_o \vec{E}_o e^{p_o x} + a_e \vec{E}_e e^{p_e x}) e^{ik_y y + ik_z z - i\omega t}, \\ \vec{H} &= (a_o \vec{H}_o e^{p_o x} + a_e \vec{H}_e e^{p_e x}) e^{ik_y y + ik_z z - i\omega t},\end{aligned}$$

а в изотропе ($x > 0$) – в виде

$$\begin{aligned}\vec{E} &= (b_o \vec{E}'_o + b_e \vec{E}'_e) e^{-p_x x} e^{ik_y y + ik_z z - i\omega t}, \\ \vec{H} &= (b_o \vec{H}'_o + b_e \vec{H}'_e) e^{-p_x x} e^{ik_y y + ik_z z - i\omega t}.\end{aligned}$$

Уравнения Максвелла дают

$$\begin{aligned}p_o^2 &= k_y^2 + k_z^2 - \epsilon_o k_0^2 \\ p_e^2 &= k_y^2 + \frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} k_z^2 - \epsilon_e k_0^2 \\ p^2 &= k_y^2 + k_z^2 - \epsilon k_0^2.\end{aligned}$$

Условия сопряжения электромагнитных полей на границе раздела приводят к системе однородных линейных уравнений относительно амплитуд a_o, a_e, b_o, b_e .

Обращение в нуль определителя этой системы дает уравнение

$$((k_z^2 - \epsilon k_0^2)p_o + (k_z^2 - \epsilon_o k_0^2)p)((k_z^2 - \epsilon k_0^2)\epsilon_o p_e + (k_z^2 - \epsilon_o k_0^2)\epsilon p) = (\epsilon_o - \epsilon)^2 k_y^2 k_z^2 k_0^2.$$

Таким образом, исследование существования поверхностных волн нам удастся свести к чисто алгебраической задаче: если в пространстве изменения пяти переменных k_y, k_z, p_o, p_e, p , в области, вырезанной неравенствам

$$p_o > 0, p_e > 0, p > 0,$$

система алгебраических уравнений

$$\begin{cases} p_o^2 = k_y^2 + k_z^2 - \epsilon_o k_0^2 \\ p_e^2 = k_y^2 + \frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} k_z^2 - \epsilon_e k_0^2 \\ p^2 = k_y^2 + k_z^2 - \epsilon k_0^2 \end{cases}$$

в союзе с уравнением (1) имеет решение, то этому решению отвечает поле, удовлетворяющее уравнениям Максвелла, условиям сшивке на границе раздела и экспоненциально убывающая при удалении от границы раздела.

Исследование системы 4-х алгебраических уравнений с пятью неизвестными мы провели в системе компьютерной алгебры Sage. Нам удалось выразить все неизвестные в радикалах через величину $t = \frac{p_e}{p_o}$,

и тем самым заменить численное исследование этой системы аналитическим.

Acknowledgments. The publication was supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

Список литературы

1. Marchevskii F. N., Strizhevskii V. L., and Strizhevskii S. V. Singular electromagnetic waves in bounded anisotropic media. // Sov. Phys. Solid State 26, 857 (1984).
2. Dyakonov M. I. New type of electromagnetic wave propagating at an interface. // Sov. Phys. JETP 67, 714 (1988).
3. Bikeev O. N., Sevastianov L. A. Surface Electromagnetic Waves at the Interface of Two Anisotropic Media. // RUDN journal. Seria MIF. V. 25, No 2, 2017. P. 141–148. DOI:10.22363/2312-9735-2017-25-2-141-148.
4. Bikeev O. N. et al. Electromagnetic surface waves guided by a twist discontinuity in a uniaxial dielectric with optic axis lying in the discontinuity plane. // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. Volume 33, 2019 - Issue 15. Pages 2009-2021.

А.А. БАЦУЛИН^{1,2}, В.В. БОЧКАРЕВ^{1,2}, Б.Д. БРИЛЛИАНТОВ^{1,2},
С.Г. КЛИМАНОВ¹, А.В. КРЯНЕВ¹, В.И. ТЕРЕШКИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности,
Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕВОГО ГРАФИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Рассматривается математическое моделирование последовательности во времени выполнения работ при выводе из эксплуатации (ВЭ) объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Предполагается, что часть работ может выполняться параллельно. Задача моделирования решается в условиях неопределенности длительности выполнения работ для различных технологических операций по ВЭ рассматриваемого ОИАЭ. Для расчета времени выполнения работ каждой технологической операции и всего суммарного времени ВЭ ОИАЭ в целом используется схема Монте Карло разыгрывания времен проведения работ для каждой технологической операции. Результаты моделирования представляются в виде гистограмм распределения времен выполнения работ как для каждой операции, так и для всего процесса ВЭ рассматриваемого ОИАЭ.

A.A. BATSULIN^{1,2}, V.V. BOCHKAREV^{1,2}, B.D. BRILLIATOV^{1,2},
S.G. KLIMANOV¹, A.V. KRYANEV¹, V.I. TERESHKIN^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE NETWORK SCHEDULE FOR THE DECOMMISSIONING OF ATOMIC ENERGY USE FACILITIES

Mathematical modeling of the sequence during the execution of works during the decommissioning (RE) of nuclear facilities (NF) is considered. It is assumed that some of the work can be performed in parallel. The problem of modeling is solved under conditions of uncertainty in the duration of work for various technological operations for the RE of the considered NF. To calculate the time of execution of work for each technological operation and the total time of the nuclear power plant in general, the Monte Carlo scheme of playing the times of work for each technological operation is used. The simulation results are presented in the form of histograms of the distribution of work execution times both for each operation and for the entire SE process of the considered NF.

Построение сетевого графика выполнения работ по ВЭ ОИАЭ выполняет одну из ключевых позиций во всем процессе ВЭ ОИАЭ.

Выводимый из эксплуатации ОИАЭ состоит, как правило, из подобъектов O_j , $j=1, \dots, m$, для каждого из которых известны номера производимых технологических работ:

$$(j_1, j_2, \dots, j_{n_j}). \quad (1)$$

Все работы (технологические операции) R_i , $i=1, \dots, N$ – занумерованы индексом i (N может достигать порядка тысяч для комплексных по структуре ОИАЭ), причем нумерация работ проведена последовательно по подобъектам в последовательности их выполнения во времени.

Для всех работ R_i задана последовательность выполнения работ, предшествующих выполнению работы R_i :

$$(i_1, i_2, \dots, i_{n_i}) \quad (2)$$

где: i_l – номер работы R_{i_l} , непосредственно предшествующей работе R_i .

Расчет времени на вывод из эксплуатации всех подобъектов и всего ОИАЭ в целом реализуется с помощью разыгрывания Монте-Карло объемов работ V_i как случайных величин. Полученные суммарные времена для j -го подобъекта S_{jk} при k -м розыгрыше суммируется для всего ОИАЭ

$$T_k = \sum_{j=1}^m S_{jk}, \quad (3)$$

T_k – время на вывод из эксплуатации ОИАЭ при k -м розыгрыше объемов выполнения работ.

Затем строятся гистограммы распределения времен S_j , $j = 1, \dots, m$ ВЭ подобъектов и времени T ВЭ всего ОИАЭ, а также рассчитываются характеристики этих распределений как выходные расчетные показатели времен ВЭ ОИАЭ.

Список литературы

1. В. В. Бочкарев, Б. Д. Бриллиантов, А. В. Крянев, А. А. Бацулин, С. Г. Климанов, О. Ю. Литвиненко, Д. В. Мамай, Д. Е. Слива, Д. С. Смирнов, П. А. Стряпушкин, В. И. Терешкин, Д. Т. Ханбикова. Структура системы поддержки принятия оптимальных решений при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. // Вестник НИЯУ МИФИ, т. 9, №4, 2020.

В.В. КУЗЕНОВ, А.В. РУДИНСКИЙ, С.В. РЫЖКОВ,
Д.А. ЯГОДНИКОВ

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ И СОПЛОВОМ БЛОКЕ ЖРД С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

Разработана математическая модель и сформулирована численная методика процессов электризации газовых трактов элементов конструкций ракетных двигателей. Подробно описана оригинальная численная методика решения. Для процессов в камере сгорания приведена подробная физико-химическая кинетика процессов воспламенения и горения топлив в камере сгорания жидкостных ракетных двигателей. Представлен вариант математической модели физических процессов электризации, протекающих на поверхности камеры сгорания и соплового аппарата.

V.V. KUZENOV, A.V. RUDINSKY, S.V. RYZHKOV,
D.A. YAGODNIKOV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

MATHEMATICAL MODEL OF GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS IN THE COMBUSTION CHAMBER AND THE NOZZLE BLOCK OF A LIQUID-PROPELLANT ENGINE TAKING INTO ACCOUNT ELECTRIFICATION

The authors have developed a mathematical model and formulated a numerical methodology for the processes of electrification of gas paths of structural elements of rocket engines. The original numerical solution technique is described in detail. For the processes in the combustion chamber, detailed physicochemical kinetics of the processes of ignition and combustion of fuels in the combustion chamber of liquid-propellant rocket engines are given. A variant of the mathematical model of the physical processes of electrification occurring on the surface of the combustion chamber and nozzle apparatus is presented.

Моделирование физико-химической кинетики процессов воспламенения и горения компонентов топлив в рабочих трактах экспериментальных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) часто оказывается сложным и дорогостоящим. Кроме того, описание процессов электризации газовых трактов элементов конструкций ракетных двигателей напрямую связаны с теоретическим исследованием неравновесных (в числе ионизационных) течений газа и горючих смесей.

В математической модели физических процессов, протекающих на стенках камеры и соплового блока ЖРД, приведено описание граничных условий, необходимых для однозначного нахождения решения задачи электризации

ионизованными продуктами горения элементов конструкций ракетных двигателей [1-2].

Приведено описание вычислительной методики для численного решения задачи электризации газовых трактов элементов конструкций ЖРД [3-4], основанная на многоблочной многосеточной технологии расчетов на неортогональных структурированных сетках с использованием схем расщепления по физическим процессам и направлениям [5-6].

Сформулирована газодинамическая часть математической модели, включающая уравнения сохранения массы, количества движения, энергии, предназначенной для расчета пространственных распределений газодинамических параметров потока вблизи поверхности и в трактах конструкций ракетных двигателей. При этом расчетные исследования проводятся в рамках модели невязкого течения газа в двух- или трехмерной нестационарной постановке [7-8].

Результаты исследования получены в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) № 0705-2020-0044.

Список литературы

1. Ягодников Д.А. // ТВТ. 2001. Т. 39. № 5. С. 788.
2. Ягодников Д.А., Воронцовский А.В., Пушкин Н.М. // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31. С. 54-58.
3. Ягодников Д.А., Рудинский А.В. // ТВТ. 2017. Т. 55. С. 828-845.
4. Рудинский А.В., Ягодников Д.А. // ТВТ. 2019. Т. 57. С. 777-785.
5. Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. // ZAMP. 2019. V. 70. P. 46.
6. Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Рыжков С.В. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 328 с.
7. Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 132. P. 587-592.
8. Кузенов В.В., **Рыжков С.В.** // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 9. С. 19–32.

С.Ф.ЛАВРОВА, Н.А.КУДРЯШОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ДУФФИНГА

Обобщенное уравнение Дуффинга исследуется с помощью метода Мельникова для поиска необходимых условий на значения параметров, при которых в системе существует хаос. Полученный аналитически результат подтвержден численно путем построения бифуркционных диаграмм.

S.F.LAVROVA, N.A.KUDRYASHOV

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

NONLINEAR DYNAMICAL REGIMES OF THE GENERALIZED DUFFING EQUATION

Melnikov's method is applied to the generalized Duffing equation to find the necessary conditions for the values of the parameters at which chaos exists in the system. The result obtained analytically is confirmed numerically by constructing bifurcation diagrams.

Рассматривается обобщенное уравнение Дуффинга

$$y_{zz} - y + \gamma_1 y^3 + \gamma_2 y^5 = A_0 \cos z, (1)$$

полученное при переходе к переменным бегущей волны в уравнении для описания распространения импульсов в оптическом волокне [1].

Уравнение (1) при $A_0 = 0$ и некоторых значениях параметров обладает гомоклиническими орбитами. В частности, при $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 1$ гомоклинические орбиты невозмущенной системы (1) имеют вид:

$$\Gamma_{1ho}^{\pm} = (y_{11ho}^{\pm}, y_{12ho}^{\pm}) = \left\{ \frac{\pm 2^{1/2} 3^{1/4} e^{z-z_0}}{(e^{4(z-z_0)} + 1)^{1/2}}, \mp \frac{2^{1/2} 3^{1/4} e^{z-z_0} (e^{4(z-z_0)} - 1)}{(e^{4(z-z_0)} + 1)^{3/2}} \right\} (2)$$

В случае $A_0 \neq 0$ (1) возмущение может привести к возникновению в системе хаоса типа отображения подковы, возникающего при трансверсальном пересечении устойчивого и неустойчивого многообразий системы, расстояние между которыми описывает функция Мельникова. Функция Мельникова (1) вдоль гомоклинической орбиты (2) принимает вид

$$M^{\pm}(z_0) = \int A y_{12ho}^{\pm} \cos(z + z_0) dz = \mp \frac{2^{1/2} 3^{1/4} A \sin z_0 \Gamma\left(\frac{1}{4} + \frac{i}{4}\right) \Gamma\left(\frac{1}{4} - \frac{i}{4}\right)}{4\pi^{1/2}} (3).$$

Функция (3) всегда имеет простые нули, значит в (1) для рассматриваемых значений параметров хаос наблюдается всегда. Контролировать хаос в уравнении (1) можно, например, добавляя к возмущению члена ky_z , приводящего к новой функции Мельникова:

$$M^{\pm}(z_0) = \int Ay_{12ho}^{\pm} (\cos(z + z_0) - ky_{12ho}^{\pm}) dz = \mp \frac{2^{1/2} 3^{1/4} A \sin z_0 \Gamma(\frac{1}{4} + \frac{i}{4}) \Gamma(\frac{1}{4} - \frac{i}{4})}{4\pi^{1/2}} - \frac{3^{1/4} k\pi}{4}. (4)$$

Функция Мельникова (4) не имеет простых нулей при выполнении следующего неравенства:

$$\frac{2^{1/2} 3^{1/4} A \Gamma(\frac{1}{4} + \frac{i}{4}) \Gamma(\frac{1}{4} - \frac{i}{4})}{4\pi^{1/2}} \geq \frac{3^{1/4} k\pi}{4}. (5)$$

Согласно (5) при $k = 1$ нижняя граница значения параметра A , при котором (1) возникает хаос: $A \approx 0.84$. Полученное аналитически значение согласуется с бифуркационной диаграммой на рис. 1.

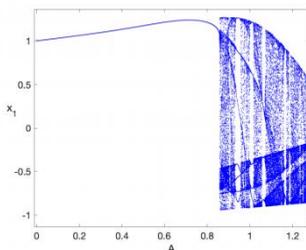


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма системы (1) при $k = 1$

Список литературы

1. Kudryashov, Nikolay A. // Optik 189 (2019): 42-52.
2. Wiggins, Stephen. Introduction to applied nonlinear dynamical systems and chaos. Vol. 2. // Springer Science & Business Media, 2003.

А.С. ЛЕОНОВ, О.В. НАГОРНОВ, С.А. ТЮФЛИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭПИДЕМИИ COVID-19

Рассмотрены обратные задачи для восстановления коэффициентов обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих распространение коронавирусной инфекции. Исследуются известные модели SEI и SEIR, а также приводится их обобщение на случай переменных коэффициентов. Данный подход позволяет решить задачу с несколькими волнами эпидемии и выполнить прогноз дальнейшего распространения.

A.S. LEONOV, O.V. NAGORNOV, S.A. TYUFLIN

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

INVERSE PROBLEM FOR COEFFICIENTS OF EQUATIONS DESCRIBING PROPAGATION OF COVID-19 EPIDEMIC

The inverse problems for coefficients of ordinary differential equations describing propagation of coronavirus infection are studied. The well-known models of SEI and SEIR, and their generalization are used. This approach allowed us to solve the problem with several waves of epidemic and to predict further propagation.

Известные модели SEI и SEIR с постоянными коэффициентами не могут описать появление второй и дальнейших волн эпидемии. Получаемые при решении обратных задач коэффициенты этих моделей для различных волн существенно отличаются. В связи с этим возникает гипотеза о переменных коэффициентах этих моделей [1]. Именно изменение коэффициента заражения β , связанное с социальными, сезонными и другими факторами, должно приводить к появлению второй волны эпидемии. То же касается и других коэффициентов модели SEI. В данной работе рассматривается описание сразу нескольких волн эпидемии в разных странах с помощью модели SEI с переменными коэффициентами и исследование модели SEIR в этом случае.

Модель SEI в нормированной форме имеет следующий вид:

$$\dot{S} = -\beta(t)S(I+E), \quad \dot{E} = \beta(t)S(I+E) - (\gamma(t) + \delta(t))E, \quad \dot{I} = \delta(t)E - \gamma(t)I \quad (S(t_0) = \alpha, \quad E(t_0) = 0, \quad I(t_0) = I_0).$$

Она включает неизвестные функции $\beta(t)$, $\gamma(t)$, $\delta(t)$ и неизвестный параметр α . Динамику изменений этих функций можно интерпретировать по-разному. Функция $\beta(t)$ пропорциональна вероятности заражения, и она может меняться вследствие мер здравоохранения рассматриваемой страны по снижению этого фактора. Уменьшение функции $\beta(t)$ можно считать реакцией на введенные ограничительные меры. Ослабление этих мер может вести к росту

функции $\beta(t)$. Увеличение функции $\gamma(t)$ можно интерпретировать как снижение среднего времени диагностирования заболевания. Увеличение функции $\delta(t)$ отражает уменьшение среднего времени излечения. Рост этого времени можно интерпретировать как убывание функции. Во всяком случае, изменения коэффициентов отражает реакцию здравоохранения и общества страны в целом на течение эпидемии.

Нахождение трех неизвестных функций $\beta(t)$, $\gamma(t)$, $\delta(t)$ по единственной кривой данных $I(t)$ является типичной некорректно поставленной задачей. Обычное ее решение может не существовать, быть не единственным и быть неустойчивым по отношению к ошибкам регистрации данных. Ввести такую задачу в класс корректности теоретически можно, используя дополнительные априорные ограничения на решение. Альтернативой является использование специальных методов решения некорректно поставленных задач - регуляризирующих алгоритмов. Наиболее употребительным на практике является метод регуляризации А.Н.Тихонова с апостериорным выбором параметра регуляризации. Поэтому представленный алгоритм был модифицирован. Вместо минимизации функционала невязки на множестве, в данной работе используется минимизация функционала Тихонова.

Таким образом, оказывается возможным оценить вариабельность переменных коэффициентов для каждой фиксированной страны в связи с возможной неоднозначностью решения обратной задачи, или другими словами, апостериорно оценить точность регуляризованного решения обратной задачи. Найденные треки переменных коэффициентов существенно зависят от страны. Однако, общим в их поведении является падение коэффициента на подъеме первой волны и его рост на подъеме второй волны. Подобный анализ поведения переменных коэффициентов модели позволяет оценить качество стратегии борьбы с эпидемией в различных странах. Это позволяет в определенной мере сравнить эти стратегии.

Список литературы

1. Yi-Cheng Chen and others. // arXiv:2003.00122v6 [q-bio.PE] 2020.

С.В. МЕЛЕШКО, Э. ШУЛЬЦ

*Колледж математики, Институт Науки, Технологический Университет им.
Суранари, СУТ, Накхон Ратчасима, Таиланд*

ОБОБЩЕННЫЕ ПРОСТЫЕ ВОЛНЫ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ, ЗАПИСАННЫХ В ИНВАРИАНТАХ РИМАНА

Анализ решений многих моделей механики сплошных сред сводится к решению системы однородных уравнений, записанных в инвариантах Римана. В частности, одномерные уравнения газовой динамики и уравнения, описывающие поведение нелинейно-упругого материала. В докладе показано, что решение задачи Коши для такой системы, допускающей дифференциальную связь, сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведены примеры решений для некоторых исходных данных.

S.V. MELESHKO, E.SCHULZ

*School of Mathematics, Institute of Science, Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima, Thailand*

GENERALIZED SIMPLE WAVES OF SYSTEMS OF EQUATIONS WRITTEN IN RIEMANN INVARIANTS

Analysis of solutions of many models of continuum mechanics is reduced to solving a system of homogeneous equations written in Riemann invariants. In particular, one-dimensional gas dynamics equations and equations describing the behavior of a nonlinear elastic material. It is shown in the presentation that the solution of the Cauchy problem for such a system admitting a differential constraint reduces to the solution of a system of ordinary differential equations. Examples of solutions for some initial data are given.

А.С. МОКЕЕВ, В.М. ЯМЩИКОВ

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

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛОСКИМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ТОНКОЙ ЛИНЗЫ

На примере задачи фокусировки лазерного излучения с плоским волновым фронтом в приближении тонкой линзы рассмотрены особенности вычисления интеграла Гюйгенса-Френеля стандартными квадратурными методами численного интегрирования и специализированным методом коллокаций Левина. Для квадратурных методов численного интегрирования получен критерий оценки шага интегрирования в зависимости от размеров области наблюдения в фокальной плоскости линзы и требуемой точности вычислений. Показаны преимущества использования специализированного метода коллокаций Левина над стандартными методами численного интегрирования.

A.S. MOKEEV, V.M. YAMSHCHIKOV

Institute of lasers and physical investigations, RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

NUMERICAL INTEGRATION METHODS COMPARE AT THE LASER BEAM WITH PLANE WAVEFRONT FOCUSING TASK BY THIN LENS APPROXIMATION

Calculation Huygens-Fresnel integral characteristics by standard quadrature methods numerical integration and special Levin collocation method are considered on the example of a laser beam with plane wavefront focusing task by thin lens approximation. The step estimation criterion for quadrature numerical integration methods depending on screen size and required calculation accuracy is given. The advantages of using the special Levin collocation method by comparison with standard quadrature methods numerical integration are shown.

Во многих задачах о распространении лазерного излучения в среде возникает необходимость учета волновой природы света, в частности, это задачи дифракции, фокусировки лазерного излучения, оценки расходимости и др. Решение данных задач основано на вычислении интеграла Гюйгенса-Френеля [1-2]:

$$E_P = \frac{ik}{2\pi} \int_S E_M \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} dS, \quad (1)$$

где E_P – амплитуда дифрагированной волны в точке наблюдения P , E_M – амплитуда падающей волны в произвольной точке M волновой поверхности, k – модуль волнового вектора падающей волны, dS – площадь участка волновой поверхности, а ρ – абсолютная величина радиус-вектора от точки M до точки P .

Вопросам разработки, исследования, тестирования и применения численных методов приближенного вычисления определенных интегралов посвящено большое количество работ [3-8].

Использование традиционных алгоритмов для вычисления интеграла от быстро осциллирующих функций подразумевает расчет по квадратурным формулам (метод прямоугольников, трапеций), что требует подробного шага разбиения и приводит к значительным затратам вычислительных ресурсов [3-5].

Существуют и другие, более сложные и специализированные методы. Для интегралов от функций с фазой линейной формы часто используют метод Филона [6]. В случаях с более сложной фазовой функцией может быть использован метод коллокаций Левина [7]. Он заключается в переходе к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), чаще всего невырожденной.

В данной работе приведены результаты сравнения стандартных квадратурных методов интегрирования дифракционного интеграла (1) со специализированным методом коллокаций Левина и аналитическим решением на примере задачи фокусировки лазерного излучения с плоским волновым фронтом в приближении тонкой линзы.

Список литературы

1. Ахманов С.А. Физическая оптика: Учебник. 2-е изд. / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. // М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. – 656 с. – (Классический университетский учебник).
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. // Перевод с английского. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973.
3. Калиткин Н. Н. Численные методы. // М.:Наука, 1978. 512с.
4. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. // М.: Наука, 1989. 432с.
5. И.М. Соболев. Метод Монте-Карло. // М.: «Наука», 1978.
6. Jeffrey G. B. Louis Napoleon, George Filon (1875-1937) // Obituary Notices of Fellows of the Royal Society. — 1939. — Vol. 2, No 7. — Pp. 500–509.
7. Levin D. Procedures for Computing One and Two-Dimensional Integrals of Functions with Rapid Irregular Oscillations. // Math. Comp. — 1982. — Vol. 38, No 158. — Pp. 531–538.
8. Ловецкий К.П., Мигаль И.А. Сравнение методов вычисления интегралов от быстро осциллирующих функций. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/70TVN315.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/70TVN315.

Р.В. МУРАТОВ, Н.А. КУДРЯШОВ, П.Н. РЯБОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ

В работе анализируются результаты численного моделирования процессов формирования полос адиабатического сдвига (ПАС) с использованием одномерных и двумерных моделей деформации. В серии численных экспериментов устанавливаются характеристики процесса локализации пластических деформаций при различных скоростях сдвига. Проводится сравнение результатов, полученных в одномерных и двумерных расчетах.

R.V. MURATOV, N.A. KUDRYASHOV, P.N. RYABOV

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

LOCALIZATION OF PLASTIC FLOW IN ONE-DIMENSIONAL AND TWO-DIMENSIONAL PROBLEMS

In this paper one-dimensional and two-dimensional models are used for investigation of the processes of adiabatic shear bands (ASB) formation. Significant characteristics of a localization process at different nominal strain-rates are studied in the series of the numerical simulations. The results obtained for one-dimensional and two-dimensional problems are compared.

Локализация пластических деформаций при высокоскоростном нагружении материалов является одним из механизмов отказа материалов. Интенсивные нагрузки материалов встречаются во многих процессах при обработке материалов в военной, аэрокосмической и атомной промышленности, где требуется высокая надежность. Поэтому в последние десятилетия большое количество исследований посвящено изучению данного феномена.

В исследованиях часто применяются экспериментальные подходы, а также численное моделирование [1]. Для моделей упруго-пластики существенным является наличие нелинейности, из-за сложности таких моделей аналитические исследования часто ограничиваются рассмотрением только одномерных случаев [2]. В данной работе исследуется возможность обобщения результатов, полученных для одномерных моделей, на многомерный случай. Изучаются процессы формирования ПАС в трех различных по свойствам материалах: высокопрочной стали, алюминии и уране.

В серии численных экспериментов рассматриваются сдвиговые деформации квадратного образца 10×10 мм из различных материалов при различных скоростях деформации. Каждая из задач моделируется с использованием одномерных и двумерных математических моделей. По результатам моделирования вычисляются такие параметры процесса локализации как

среднее время локализации деформаций, а также характерное расстояние между полосами адиабатического сдвига в материале.

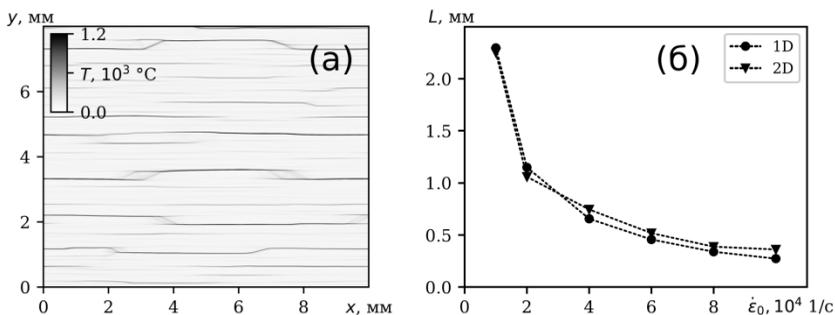


Рис. 1. Распределение температуры в образце из урана (а). Характерное расстояние между ПАС (б) в уране при различных скоростях деформации.

На рисунке 1а показано распределение температуры в образце урана при номинальной скорости сдвига $2 \cdot 10^4$ 1/с. Темные полосы характеризуют более высокие значения температуры, которые достигают температуры плавления урана (1176 °C). В данных узких областях происходит локализация пластических деформаций. ПАС вытянуты вдоль направления сдвига, характерное расстояние между ними составляет около 1.1 мм. Расстояния между ПАС при различных скоростях сдвига приведены на рисунке 1б. Зависимости построены по результатам численного моделирования с использованием одномерных и двумерных моделей. Из графика следует, что расстояние между полосами совпадает для одномерных и двумерных задач. Однако, это справедливо не для всех характеристик процесса, так, время локализации возрастает при рассмотрении двумерного случая. Аналогичные результаты были получены для других материалов (стали и алюминия).

Список литературы

1. M. Dolinski, M. Merzer, D. Rittel // Int. J. Impact. Eng. 2015. Vol. 85, P. 20–26.
2. Muratov R.V., Kudryashov N.A., Ryabov P.N. // Appl. Math. Comput. 2018. Vol. 338, P. 164–174.

М.А. ПИКАЛОВА

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Проведен обзор метода расчета и моделирования формы капли в однородном поле силы тяжести. Представлено решение уравнения Лапласа для цилиндрической капли, расположенной на круговой цилиндрической поверхности. Приведены результаты моделирования для различных геометрических параметров капли.

М.А. PIKALOVA

Institute of lasers and physical investigations, RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

MODELLING OF THE CYLINDRICAL LIQUID DROP IN THE HOMOGENEOUS FIELD OF GRAVITY

The review of the computational method and modeling of the drop form in the homogeneous field of gravity is carried out. The solution of the Laplace equation for the cylindrical drop that is located on the circular cylindrical surface is submitted. Results of modeling for different geometrical parameters of the drop are given.

Исследование поверхностных эффектов жидкости имеет большое прикладное значение, так как многие технологические процессы связаны с растеканием жидкости по твердой поверхности. Именно поэтому понимание этих процессов во многом влияет на создание новых технологий и материалов. В связи с перспективностью использования пористых структур, образованных тонкими проволоками, для различных технических приложений была получена цилиндрическая форма капли жидкости.

Обычно рассматриваются задачи о форме оси-симметричной капли на плоской горизонтальной поверхности [1]. В данной работе решается уравнение Лапласа для цилиндрической капли. Целью настоящей работы является определение равновесной формы капли в зависимости от её массы.

В ходе работы были получены зависимости массы и толщины капли от области смачивания цилиндра. Представлены результаты моделирования формы капли для некоторого характерного значения радиуса цилиндра.

Список литературы

1. Матюхин С. И., Фроленков К. Ю. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15. № 3. С. 292-304.

В.М.РУДЕНКО, Е.В.КОРОТКОВ

ФИЦ Фундаментальные основы биотехнологии РАН, Москва, Россия

ПОИСК СЛАБО ПОДОБНЫХ ТАНДЕМНЫХ ПОВТОРОВ В АМИНОКИСЛОТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ БЕЛКОВ С УЧЕТОМ ПАРНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Предложен метод поиска слабо подобных тандемных повторов (МПСПТП) в аминокислотных последовательностях белков с учетом парных корреляций. Проведено сравнение с существующими подходами, использующимися для решения данной задачи. Сделан вывод, что разработанный метод выявляет тандемные повторы на значительно более длинных участках последовательности белка, а также имеющих высокую степень эволюционной дивергенции.

V.M.RUDENKO, E.V.KOROTKOV

FRC Fundamentals of Biotechnology RAS, Moscow, Russia

SEARCH FOR PERIODICITY IN PROTEINS TAKING INTO ACCOUNT PAIRED CORRELATIONS

It's described the method for the search for weakly similar tandem repeats in amino acid sequences, taking into account pairwise correlations. A comparison with the existing approaches used to solve this problem is presented. It was concluded, that the proposed method detects tandem repeats on much longer protein fragments and with greater degree of evolutionary divergence.

Тандемные, т.е. повторяющиеся непосредственно друг за другом, повторы (ТП), были обнаружены в аминокислотных последовательностях белков достаточно давно. Белки с повторами играют в клетке структурную функцию, позволяют участвовать во межмолекулярных взаимодействиях, быть катализаторами различных процессов, участвовать в передаче наследственной информации. Эти причины обуславливают интерес к задаче обнаружения ТП в белках компьютерными методами.

Нами предлагается новый метод поиска слабо подобных тандемных повторов (МПСПТП) в последовательностях белков с учетом парных корреляций. Он состоит из 4 шагов. На первом шаге осуществляется перекодировка символов исходного аминокислотного алфавита 20 символов в алфавит 5 символов в соответствии с полярностью аминокислотных радикалов. На втором шаге определяется частотная матрица встречаемости пар символов в различных позициях повтора. Далее на ее основе формируется позиционно-весовая матрица. Третий шаг состоит в применении метода циклического выравнивания. Заключительный этап заключается в определении уровня статистической значимости методом Монте-Карло.

Для поиска ТП мы использовали банк данных Uniprot. Для обнаруженных ТП мы рассчитывали длину последовательности и степень эволюционной дивергенции. Она вычислялась как доля символов, которые не совпадают с общим паттерном повтора.

Было проведено сравнение разработанного метода с наиболее популярными аналогами: T-REKS[1], XSTREAM [2]. По общему числу найденных ТП в белках МПССТП уступает им. Так в банке данных uniprot МПССТП обнаружил 15414 фрагментов с ТП, в то время как T-REKS нашел 43799, а XSTREAM – 23939. Однако длины фрагментов, содержащих ТП, и степень дивергенции повторов от общего паттерна для нашего и других методов значительно отличаются. На рис. 1 приведена статистика числа фрагментов, содержащих ТП: а) с длиной фрагмента большей, чем аргумент, б) с дивергенцией большей, чем аргумент. Видно, что T-REKS и XSTREAM ориентированы на поиск коротких, практически идентичных повторов, в то время, как наш метод способен выявить сильно дивергировавшие повторы на значительно большей длине. Короткие повторы МПССТП не видит, так как минимально мы можем обнаружить 4 tandemных повтора.

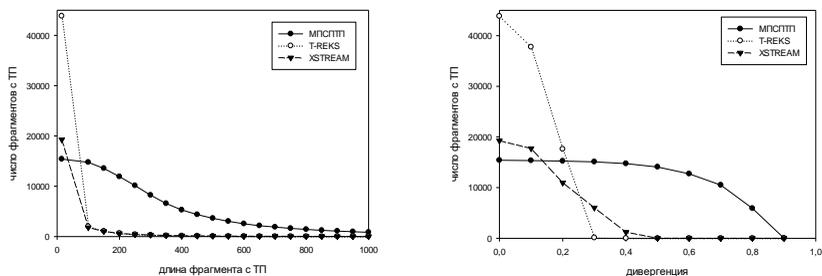


Рис. 1. Число ТП в зависимости от а) длины фрагмента, б) дивергенции

Таким образом, области действия МПССТП и используемых в настоящее время подходов различны. Для поиска ТП рекомендуется использовать комбинацию этих методов.

Список литературы

1. Kajava A.V. // J.Str.Biol. 2012. Vol. 179, № 3, P. 279-288.
2. Newman A., Cooper J. // BMC Bioinformatics. 2007. Vol. 8, P.1–19.

Д.В. САФОНОВА, Н.А. КУДРЯШОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Рассмотрено уравнение в частных производных шестого порядка со степенными и нелокальными нелинейностями, которое используется для описания оптических импульсов. Построена редукция уравнения в переменных бегущей волны, имеющая вид системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Выполнен тест Пенлеве для системы ОДУ. Показано, что система не проходит тест Пенлеве. При выполнении третьего шага теста Пенлеве найдены условия совместности системы ОДУ, при этих условиях остается только одно ОДУ шестого порядка. Построены точные решения методом простейших уравнений.

D. V. SAFONOVA, N. A. KUDRYASHOV

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

EXACT SOLUTIONS OF THE NONLINEAR DIFFERENTIAL EQUATION FOR DESCRIBING PULSES WITH HIGH DISPERSION

The sixth-order partial differential equation with power and nonlocal nonlinearities is considered, which is used to describe optical pulses. The traveling wave reduction of the equation is constructed in the form of a system of ordinary differential equations (ODE). The Painlevé test for the ODE system is performed. It is shown that the system does not pass the Painlevé test. When performing the third step of the Painlevé test, the conditions for the consistency of the ODE system are found, under these conditions only one sixth order ODE remains. Exact solutions are constructed by the method of the simplest equations.

Рассматривается нелинейно дифференциальное уравнение шестого порядка, предложенное в статье [1] для описания импульсов в оптических средах:

$$\begin{aligned} iu_t + au_{xx} + i\beta u_{xxx} + \chi u_{xxx} + i\delta u_{xxxxx} + u_{xxxxxx} + |u|^2u + v|u|^4u + \\ + \kappa|u|^6u + \rho|u|^2u_{xx} + \varepsilon|u|^4u_{xx} + \tau|u|^2u_{xxx} + i\frac{\varepsilon\delta}{3}u^4u_x + i\frac{\rho\delta}{3}|u|^2u_x + \\ + 2i\frac{\tau\delta}{3}|u|^2u_{xxx} + i\frac{\tau\delta^3}{27}|u|^2u_x = 0 \end{aligned}$$

Для изучения уравнения используем переменные бегущей волны:

$$u(x, t) = y(z)e^{i(\psi(z) - \omega t)}, \quad z = x - C_0t.$$

После подстановки этой замены в уравнение можно разделить мнимую и действительную части, таким образом получив систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Для полученной системы был проведен тест Пенлеве. Система ОДУ не проходит тест Пенлеве, но при выполнении третьего

шага были получены условия, при которых система уравнений становится совместной:

$$C_0 = -\frac{1}{3}\alpha\delta - \frac{1}{27}\chi\delta^3 - \frac{1}{81}\delta^5,$$

$$\beta = \frac{2}{3}\chi\delta + \frac{5}{27}\delta^3,$$

$$\psi_z = -\frac{1}{6}\delta.$$

При этих условиях получаем одно обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} & \kappa y^7 + \left(\frac{1}{36}\varepsilon\delta^2 + \nu\right)y^5 + \varepsilon y_{zz}y^4 + \left(\frac{5}{1296}\tau\delta^4 + \frac{1}{36}\rho\delta^2 + \mu\right)y^3 + + \left(\tau y_{xxxx} + \right. \\ & \left. \frac{1}{6}\tau\delta^2 y_{zz} + \rho y_{zz}\right)y^2 + \left(\frac{5}{1296}\chi\delta^4 + \frac{1}{36}\alpha\delta^2 + \omega + \frac{61}{46656}\delta^6\right)y + + y_{xxxxxx} + \\ & \left(\chi + \frac{5}{12}\delta^2\right)y_{xxxx} + \left(\alpha + \frac{1}{6}\chi\delta^2 + \frac{25}{432}\delta^4\right)y_{zz} = 0 \end{aligned}$$

Для этого уравнения были построены точные решения методом простейших уравнений [2]. Получено решение в виде периодической волны, выраженное через эллиптический синус:

$$y(z) = \pm A \frac{\sqrt{-a(\theta+4c)}}{2a} \operatorname{sn}\left(\frac{\sqrt{\theta}}{2}(z-z_0), K\right),$$

$$\theta = 2\sqrt{c^2 - 4ad} - 2c, \quad K = \frac{4\sqrt{ad}}{\theta},$$

z_0 —произвольная постоянная, A , c , d , ω выражаются через другие параметры уравнения и параметр a . Также получено решение, имеющее вид уединенной волны:

$$y(z) = \pm A \frac{4ace^{\sqrt{c}(z-z_0)}}{e^{2\sqrt{c}(z-z_0)} - 4ac},$$

z_0 —произвольная постоянная, A , c , μ , ω выражаются через другие параметры уравнения и параметр a .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), № 18-29-10039.

Список литературы

1. Kudryashov N.A. Construction of nonlinear equations for description of propagation pulses in optical fiber. // Optik. 2019. Vol. 192, 162964.
2. Kudryashov N.A. Simplest equation method to look for exact solutions of nonlinear differential equations. // Chaos Soliton Fractals. 2005. Vol. 24, P. 1217-1231

А.Г. СБОЕВ^{1,2}, А.А. СЕЛИВАНОВ¹, Р.Б. РЫБКА¹,
И.А. МОЛОШНИКОВ¹, Г.В. РЫЛКОВ¹, С.Г. СБОЕВА³

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Ф ГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)», Москва, Россия

БАЗОВЫЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СВЯЗЕЙ НАЗВАНИЯ МЕДИКАМЕНТА (DRUGNAME) С ЕГО ПОБОЧНЫМ ЭФФЕКТОМ (ADR) В ОТЗЫВАХ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

В данном исследовании рассмотрена задача автоматического определения побочных эффектов приёма медикаментов в текстах отзывов о медикаментах на русском языке. Представлены результаты определения связей Drugname-ADR, используя классические методы машинного обучения. По метрике macro-averagedf1 наивная байесовская модель с многомерным нормальным распределением и tf-idf-векторизацией n-грамм от 1 до 3 дала лучший результат: 75%, что превышает результат случайной генерации метки на 21%.

A.G. SBOEV^{1,2}, A.A. SELIVANOV¹, R.B. RYBKA¹,
I.A. MOLOSHNIKOV¹, G.V. RYLKOV¹, S.G. SBOEVA³

¹National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

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

³I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow,
Russia

A BASELINE ON MACHINE LEARNING METHODS FOR RELATION EXTRACTION OF DRUG ADVERSE EFFECTS IN REVIEWS TEXTS ON RUSSIAN

The study considers the task of drug adverse effect recognition in reviews texts on Russian. Experiments carried out to determine baseline accuracy on classic machine learning methods. Naive Bayes Model with multinomial distribution and tf-idf n-gram vectorization achieved the best macro-averaged f1-score: 75%, which is higher by 21% than random label generation.

Автоматическое извлечение значимой информации о побочных эффектах является актуальной задачей[1], решение которой позволяет расширить информационную базу для целей фармаконадзора по побочным эффектам и способствует успешному репрофилированию лекарственных средств.

В данной работе используются тексты корпуса размеченных отзывов на медикаменты RussianDrugReviewCorpus[2,3], в которых экспертами аннотированы медицинские сущности, в частности ADR (побочный эффект) и Drugname (название медикамента), а также связи между ними: 4289 пары сущностей, которые образуют связь, и 1132 пары с отсутствием связи. Ниже рассматривается задача выделения отношений Drugname-ADR.

Данные разделены на две выборки: тренировочную (80%) и тестировочную (20%) со стратификацией классов, связи из каждого текста содержатся только в одной из них.

Для векторного представления данных использовалась конкатенация векторов сущностей, полученных с помощью TF-IDF *n*-грамм символов. Подбирались параметры: размер *n*-грамм и ограничение по частоте встречаемости *n*-граммы.

В качестве базовых моделей машинного обучения рассмотрены логистическая регрессия, машина опорных векторов, наивная байесовская модель, градиентный бустинг. Метрика оценки модели – macro-averaged f1. Лучший результат дала наивная байесовская модель с многомерным нормальным распределением, tf-idf-векторизацией, *n*-граммами от 1 до 3, частотой встречаемости *n*-грамм от 0.05 до 0.95. Точность: 75%, что превышает результат случайной генерации метки на 21%.

Данные результаты впервые фиксируют базовую точность для выделения побочных эффектов медикаментов для русскоязычных текстов в формулировке выделения отношений Drugname-ADR и могут быть использованы в качестве отправной точки для сравнения с разрабатываемыми методами на основе глубоких нейронных сетей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20246).

Список литературы

1. Henry S, Buchan K, Filannino M, Stubbs A, Uzun O. 2018 n2c2 shared task on adverse drug events and medication extraction in electronic health records. // J AmMedInformAssoc. 2020 Jan 1;27(1):3-12. doi: 10.1093/jamia/ocz166. PMID: 31584655; PMCID: PMC7489085.
2. AG Sboev, SG Sboeva, AV Gryaznov, AV Evteeva, RB Rybkaand MS Silin. A neural network algorithm for extracting pharmacological information from russian-language internet reviews on drugs. // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1686, 2020.
3. Russian Drug Review Corpus. <https://sagteam.ru/en/med-corpus/>.

А.Г. СБОЕВ^{1,2}, Ю.А. ДАВЫДОВ¹, Р.Б. РЫБКА¹

¹*Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва, Россия*

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

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПЕРЕВОДА ТЕКСТОВЫХ КОМАНД МОБИЛЬНОМУ РОБОТУ НА ЕСТЕСТВЕННОМ РУССКОМ ЯЗЫКЕ В СЕМИОТИЧЕСКИЙ ФОРМАТ RDF

Представлен алгоритм, основанный на комбинации нейросетевой и языковой моделей, позволяющий преобразовывать текстовые команды, адресованные мобильному роботизированному устройству, в формат, соответствующий внутреннему семиотическому миру робота. Представлены результаты экспериментов по оценке точности распознавания моделью на командах, сгенерированных процедурно и собранных при помощи краудсорсинга. На собранных данных образцовых команд получена средняя точность по пяти разбиениям, равная 72.8%.

A.G. SBOEV^{1,2}, Yu.A. DAVIDOV, R.B. RYBKA¹,

¹*National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

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

NEURAL NETWORK MODEL FOR CONVERSION OF TEXT COMMANDS FOR A MOBILE ROBOT IN NATURAL RUSSIAN LANGUAGE INTO THE SEMIOTIC FORMAT RDF

An algorithm based on a combination of a neural network model and a language model is presented, that performs conversion of text commands addressed to a mobile robotic device into a format corresponding to the inner semiotic world of the robot. We also present the results of experiments aimed at assessing the accuracy of model recognition on commands generated procedurally and collected via crowdsourcing. On the collected data from the exemplary commands, an average accuracy of 72.8% was obtained across five partitions.

Проблема управления мобильным роботизированным устройством в сложных условиях, представляется крайне важной для различных отраслей промышленности и науки. Многообразие ситуаций, в которых необходимо применение подобных устройств, диктует необходимость безошибочного распознавания передаваемых пользователем устройству команд.

В работе представлен алгоритм, преобразующий команды, заданные пользователем в текстовом формате, во внутреннее представление робота основанное на семиотической сети.

Распознавание внутри алгоритма происходит в два этапа: на первом произнесенная команда векторизуется при помощи языковой модели FastText. Далее полученная последовательность числовых векторов передается в

сверточно-рекуррентную нейронную сеть, которая осуществляет многоклассовую классификацию полученного примера. Наконец, активности сети переводятся в формат RDF (ResourceDescriptionFramework) – семиотическое представление, при помощи которого осуществляется непосредственное управление роботом. Топология сети устроена следующим образом: на выходе сети находятся семь параллельных полносвязных слоёв по числу атрибутов управляющей команды: тип действия, направление, объекты и отношения между ними. Информация на них поступает из двух расположенных параллельно двунаправленных слоёв GRU: на первый, связанный только с первыми двумя полносвязными слоями, векторизованная команда поступает сразу, а на второй, связанный с остальными пятью – после прохода через свёрточный слой. Эксперименты показали, что именно такая топология обеспечивает наиболее эффективную классификацию.

Для оценки точности классификации моделью использовался корпус, составленный из 10524 команд, 90% которых были получены процедурно, при помощи генератора, а 10% – собраны с использованием краудсорсинга. Тестирование проводилось с использованием кросс-валидации на пяти разбиениях (фолдах). Тестовая выборка содержала только примеры команд, написанные реальными людьми, а валидационная и тренировочная выборки – в основном сгенерированные примеры. В эксперименте использовалась метрика точности по полному совпадению выходов нейросети и эталонных атрибутов команды. Полученные точности по описанной метрике с разбиением по фолдам составили 72%, 72%, 71%, 70% и 79%.

Полученные результаты свидетельствуют, что предложенный подход к распознаванию команд является перспективным, поскольку даже при использовании жесткой метрики «полного совпадения» и тестировании исключительно на собранных при помощи краудсорсинга командах позволяет получать весьма высокую точность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке внутреннего гранта НИЦ «Курчатовский Институт» (приказ № 1055).

А.Г. СБОЕВ^{1,2}, А.А. СЕЛИВАНОВ¹, Р.Б. РЫБКА¹,
И.А. МОЛОШНИКОВ¹, А.В. ГРЯЗНОВ¹

¹*Национальный исследовательский центр «Курчатowskiй Институт», Москва, Россия*

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

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЗЮМИРОВАНИЯ ТЕКСТОВ НА БАЗЕ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

В исследовании рассмотрены достижения последних лет в области автоматического резюмирования текстов на основе глубоких нейронных сетей, в том числе с применением обучения с подкреплением. Показано, что модели на основе экстрактивного подхода дают более высокую точность по метрике ROUGE, однако отмечено, что абстрактивный подход концептуально более перспективен. Отмечено, что текущие точности методов на основе обучения с подкреплением ниже, чем у методов на основе классического обучения, что может быть объяснено использованием менее совершенных моделей в качестве агентов и возрастающей вычислительной сложностью.

A.G. SBOEV^{1,2}, A.A. SELIVANOV¹, R.B. RYBKA¹,
I.A. MOLOSHNIKOV¹, A.V. GRYAZNOV¹

¹*National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

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

ON IMPROVEMENT OF MODERN TEXT SUMMARIZATION MODELS BASED ON REINFORCEMENT LEARNING

The study considers recent years achievements over automatic text summarization task based on deep neural networks including ones based on a reinforcement learning. It was shown that an extractive approach shows better accuracy on ROUGE metric, but abstractive approach is more ambitious in concept. It's also noted that current accuracy of reinforcement learning-based methods is lower, than supervised learning ones, which could be explained by using less sophisticated models as agents in reinforcement learning studies, and higher computational complexity of such models.

Методы автоматического резюмирования текстов основаны на одном из следующих подходов: экстрактивный, абстрактивный или гибридный. Экстрактивный подход предполагает создание резюме на основе извлечения слов и фраз исходного текста. Абстрактивный подход предполагает генерацию резюме с использованием стороннего словаря, что позволяет включать в резюме слова и фразы, которые отсутствуют в исходном тексте. Гибридный подход является объединением двух предыдущих подходов.

При этом наибольшая точность (по метрикам ROUGE-1-f, ROUGE-2-f, ROUGE-L-f) достигается экстрактивными подходами, что частично может быть

объяснено природой метрик, по которым оценивается качество моделей. С другой стороны, абстрактивные подходы развиваются как более перспективные за счет возможной генерации резюме из слов, отсутствующих в исходном тексте.

Среди экстрактивных подходов лучшим является метод NANSum – метод на основе гетерогенного графа с использованием информации об именованных сущностях, графовых слоёв внимания и языковой модели ALBERT, точность (ROUGE-1-f/ROUGE-2-f/ROUGE-L-f): 44.68 / 21.30 / 40.75.

Наиболее точным методом на основе абстрактивного подхода является BART+R3F, ключевая особенность — использование механизма предотвращения коллапса представления, что обеспечивает более эффективную процедуру дообучения языковой модели. Достигнутая точность (ROUGE-1-f/ROUGE-2-f/ROUGE-L-f): 44.38 / 21.53 / 41.17.

Текущий уровень может быть улучшен за счет использования RL методов в совокупности с State-of-the-art моделями резюмирования текстов, что до настоящего времени не исследовалось.

Перспективными для такого исследования являются следующие методы обучения с подкреплением: инкрементальное награждение по сгенерированным частям резюме, что позволяет учесть вклад в результат (по выбранным метрикам) каждой сгенерированной части резюме; дополнение функции потерь дистанцией между сгенерированными частями для сокращения избыточности резюме; механизм “многоорукого бандита”, который обеспечивает оптимизацию нескольких функций потерь в рамках процесса обучения; добавление в награду обратной связи, при котором на каждой итерации обучения человек оценивает качество полученного резюме.

В рамках дальнейших работ предполагается развитие единого подхода на основе набора описанных выше методов для эффективного решения задачи автоматического резюмирования текстов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке внутреннего гранта НИЦ «Курчатовский Институт» (приказ № 1055).

А. Г. СБОЕВ, Н. А. КУДРЯШОВ, А. В. СЕРЕНКО, Р. Б. РЫБКА

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ SIR ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ ВОЛН КОРОНАВИРУСА В РАЗНЫХ РЕГИОНАХ

Исследуется устойчивость параметров α , β , N и $\delta = \beta / (\alpha N)$ модели Susceptible-Infected-Recovered, описывающих разные волны эпидемии в разных регионах, и показано, что во многих регионах параметры можно считать постоянными на протяжении волны.

A. G. SBOEV, N. A. KUDRYASHOV, A. V. SERENKO, R. B. RYBKA

National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

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

ANALYSIS OF THE SIR MODEL PARAMETERS FOR SEVERAL WAVES OF COVID-19 IN DIFFERENT REGIONS

Stability of the parameters α , β , N , and $\delta = \beta / (\alpha N)$ of the Susceptible-Infected-Removed model that describe different waves of the pandemic are compared for different regions, and shown to be constant throughout a wave in many regions, but mostly different from wave to wave.

Популяционная модель распространения эпидемии Susceptible-Infected-Removed (SIR) [1], несмотря на свою простоту, остается актуальной при прогнозировании заболеваемости новой коронавирусной инфекцией наряду с более сложными моделями [2]. Новые аналитические решения уравнений SIR, в частности, редуцированная однопараметрическая модель [3], определяемая параметром $\delta = \beta / (\alpha N)$, делают актуальным изучение динамики α , β , N и δ на реальных наблюдениях заболевших I и переболевших R , поскольку в действительности параметры могут изменяться со временем под действием изменений погоды, поведения людей, сдерживающих мер и других факторов, вследствие чего применимость аналитических решений ограничена определенными интервалами, на которых параметры постоянны. Во многих регионах можно выделить несколько «волн» заболевания, в ходе которых величина прироста заболевших идёт на спад, а затем снова повышается. Цель работы — исследовать устойчивость α , β , N и δ на протяжении волны, а также между несколькими волнами в пределах одного региона.

В качестве реальной динамики I и R используются данные Правительства РФ, доступные на платформе YandexDataLens, — 85 регионов РФ, а также данные из репозитория университета Дж. Хопкинса, — 1025 регионов. В докладе приведены результаты обработки данных как для отдельных регионов, так и

целых стран, в которых суммарное число заболевших превысило 100 и для которых доступно не менее 90 дней наблюдений, – всего 84 субъекта РФ и 712 регионов мира. Разделение на волны проводилось по локальным минимумам кривой ежедневных случаев заболевания, сглаженной фильтром Савицкого-Голая с шириной окна сглаживания в 31 день.

В результате одна волна получена в 65 регионах, две волны – в 253 регионах, три волны — в 228. Были подобраны методом наименьших квадратов независимо для каждой волны параметры SIR-модели α , β и N , постоянные на протяжении волны, при этом точности аппроксимации динамики I и R не менее 0.5 по метрике R^2 удалось добиться в 23 регионах с одной волной, 50 регионах с двумя волнами и 24 регионах с тремя волнами. Тест Уилкоксона по всем регионам показывает, что фиксация какого-либо параметра по первой или последней волне всегда вызывает статистически значимое понижение R^2 по сравнению с независимым подбором всех параметров, но это понижение меньше всего, если фиксировать N по последней волне, β по последней или δ по первой; регионов, в которых такая фиксация уменьшает R^2 не более чем на 0.05, насчитывается 45, 21 и 23 соответственно. В остальных регионах, как правило, в последующих волнах по сравнению с первой увеличивается N и уменьшаются β , α и δ .

Результаты анализа данных показали, что в достаточно большом числе регионов параметры модели SIR можно считать постоянными на протяжении волны.

Список литературы

1. Kermack William Ogilvy, McKendrick Anderson G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. // Proceedings of the royal society of london. Series A. — 1927. — Vol. 115, no. 772. — P. 700–721.
2. Weston C. Roda, Marie B. Varughese, Donglin Han, Michael Y. Li. Why is it difficult to accurately predict the COVID-19 epidemic? // Infectious Disease Modelling. — 2020. — Vol. 5. — P. 271 – 281.
3. Nikolay A. Kudryashov, Mikhail A. Chmykhov, and Michael Vigdorowitsch. Analytical features of the SIR model and their applications to COVID-19. // Applied Mathematical Modelling, 90:466 – 473, 2021.

С.А. ТАЧИЛИН

Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Разработана математическая модель и компьютерная программа на её основе для проведения расчетов по решению задач эллипсометрии и анализа получаемых параметров наноструктурированных материалов с использованием лазерного фотоэлектрического эллипсометра ЛЭФ-3М.

S.A. TACHILIN

Tashkent State Technical University, Uzbekistan

CALCULATION OF PARAMETERS OF NANOSTRUCTURED MATERIALS BY THE ELLIPSOOMETRY METHOD

A mathematical model and a computer program based on it have been developed to carry out calculations to solve ellipsometry problems and analyze the obtained parameters of nanostructured materials using a laser photoelectric ellipsometer LEF-3M.

Развитие современной нанотехнологии поставило задачу создания стабильных микро- и нано- структурированных на атомном и молекулярном уровне покрытий, что осуществимо лишь при наличии методов получения на поверхности пленок с воспроизводимой структурой, заданным составом и строением, а также необходимыми физико-химическими свойствами [1-3]. Следует отметить, что свойства материала, нанесенного на поверхность в виде тонких пленок, существенно отличаются от свойств того же вещества в массивных образцах и сильно зависят от характера исходной поверхности.

Поскольку оптические, электрофизические, химические и механические свойства вещества в тонких слоях тесно связаны между собой, эта задача может быть решена только привлечением специальных методов контроля состояния поверхности в их тесной взаимосвязи. Указанным требованиям удовлетворяет эллипсометрический метод исследования, однако нелинейный, комплексный и трансцендентный характер основного уравнения эллипсометрии существенно усложняет анализ экспериментальных данных.

Нами разработана математическая модель и компьютерная программа на её основе для проведения расчетов по решению задач эллипсометрии и анализа получаемых параметров наноструктурированных материалов с использованием лазерного фотоэлектрического эллипсометра ЛЭФ-3М, предназначенного для проведения изменений в состоянии поляризации монохроматического излучения, возникающего в результате его взаимодействия с исследуемым

материалом. Созданная программа основана на использовании численных методов вычисления и имеет как табличную, так и графическую форму представления рассчитанных на её основе параметров наноструктурированных материалов.

Используемый при расчете параметров наноструктурированных материалов эллипсометр ЛЭФ-3М построен по схеме PCSA и работает на длине волны $\lambda=0,6328$ мкм, имеет визуальный отсчет азимутальных углов определяемых оптическими блоками поляризатора, компенсатора и анализатора. Анализ параметров наноструктурированных материалов основан на нулевом оптическом методе, который предусматривает достижения минимальной интенсивности пучка света на выходе анализатора, путем поочередных поворотов поляризатора и анализатора.

В разработанной компьютерной программе расчета параметров наноструктурированных материалов, предусмотрен ввод значений азимутальных углов, измеренных в каждой из четырех измерительных зон. Расчет производится для фиксированного положения компенсатора используя двухзонное усреднение. Двухзонная методика позволяет избежать влияния систематических ошибок, связанных с не идеальностью оптических элементов и влиянием температуры на поляризационные параметры компенсатора. Значения поляризационных углов, полученные в каждой из четырех измерительных зон, а также значения, полученные в результате усреднений по двум и четырем зонам, могут расходиться на несколько градусов, что характеризуется не идеальностью оптической системы эллипсометра, включая компенсатор и образец.

Список литературы

1. Алфёров Ж.И. Избранные труды. Нанотехнологии. // М.: Издательский дом «МАГИСТР-ПРЕСС». 2011. – 271 с.
2. B.E. Egamberdiyev, S.A. Tachilin, A.R.Toshev, F.M. Isroilov, M.Sh. Dehkanov Study Of Formation Of Clusters Of Atoms Of Gadolinium In Silicon // Journal of Critical Reviews. Vol 7. Issue 3. 2020. ISSN-2394-5125. DOI: dx.doi.org/10.31838/jcr.07.03.60.
3. M.K. Bakhadyrkhanov, B.K. Ismaylov, S.A. Tachilin, K.A. Ismailov, N.F. Zikrillaev Influence of electrically neutral nickel atoms on electrical and recombination parameters of silicon // Journal Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2020. V. 23, No 4. P. 361-365. doi.org/10.15407/spqeo23.04.361 PACS 61.72.

А.В. ТЕТЕРЕВ^{1,2}, И.М. КОЗЛОВ¹, Л.В. РУДАК¹,
Н.И. МИСЮЧЕНКО¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДА ОТ ГОРЕНИЯ К ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В УДАРНЫХ ТРУБАХ

Разработана модель воспламенения, горения и перехода к детонации кислородно-водородной горючей смеси с примесью аргона или азота. На ее основании построен программный комплекс по моделированию ударных труб в одномерном, двумерном и трехмерном приближениях. Результаты компьютерного моделирования, как по величине задержки воспламенения, так и по динамике давления на датчиках находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

A.V. TETEREV^{1,2}, I.M. KOZLOV¹, L.V. RUDAK¹,
N.I. MISUCHENKO¹

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

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

KINETICS MODEL TRANSITION FROM COMBUSTION TO DETONATION OF HYDROGEN-OXYGEN MIXTURE IN SHOCK TUBES

A model of ignition, combustion and transition to detonation of an oxygen-hydrogen combustible mixture with an admixture of argon or nitrogen has been developed. On its basis a software package for modeling shock tubes in one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional approximations was built. The results of computer simulation, both in terms of the ignition delay value and the pressure dynamics on the sensors, are in good agreement with the experimental data.

Математическая модель, описывающая течение реагирующей газовой смеси в ударной трубе, представляет собой систему газодинамических уравнений, которая в декартовой системе координат с учетом теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{U})}{\partial z} = \mathbf{S}(\mathbf{U}),$$

где количество компонент векторов \mathbf{U} , \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{H} и \mathbf{S} определяется количеством уравнений в системе, которое, в свою очередь, зависит от используемой физической модели и соответствует числу сохраняемых величин.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \\ \rho Y_k \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho E + p)u \\ \rho u Y_k \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v u \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho E + p)v \\ \rho v Y_k \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho w u \\ \rho w v \\ \rho w^2 + p \\ (\rho E + p)w \\ \rho w Y_k \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \nabla \lambda \nabla T \\ \rho W_k \end{bmatrix},$$

где $k = 1, \dots, N$, а ρ - полная плотность газовой среды, которая в общем случае, когда среда представляет собой смесь из N компонент, определяется выражением $\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i$.

Для замыкания системы уравнений необходимо задать термическое и калорическое уравнения состояния для каждой компоненты смеси в виде $p_k = p_k(\rho Y_k, T)$ и $\varepsilon_k = \varepsilon_k(\rho Y_k, T)$. Необходимые зависимости для полных давления, температуры и энергии могут быть получены из системы уравнений: $p = \sum_k p_k(\rho Y_k, T)$, $\varepsilon = \sum_k Y_k \varepsilon_k(\rho Y_k, T)$.

Математическая модель химической кинетики представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений [1] с нелинейными коэффициентами относительно вектора массовых долей реагентов и температуры. Каждое из уравнений системы является законом сохранения соответствующего компонента смеси, реагирующего по закону Аррениуса

$$\frac{dY_i}{dt} = W_i(T, Y_1, Y_2, \dots, Y_N), \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Решение последней системы дает изменение температуры смеси и ее состава по времени в пределах одного газодинамического шага по времени, поскольку эти уравнения записаны для одного из этапов расщепления полной системы уравнений газовой динамики реагирующих смесей.

В программном обеспечении реализована возможность использования различных схем прямых и обратных реакций при моделировании химической кинетики. Проведены параметрические расчеты по воспламенению, горению и детонации в соответствии с экспериментальными данными. Результаты моделирования в основном находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [2, 3].

Список литературы

1. Бартльме Ф. Газодинамика горения. // Пер. с нем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 280 с.
2. Валидационный базис переходных процессов в горючих газовых смесях. // Зеленоград. 2016. 31с.
3. База данных для тестирования переходных процессов в реагирующих потоках. // Зеленоград. 2016. 62с.

А.В. ТЕТЕРЕВ^{1,2}, Л.К. СТАНЧИЦ¹, Л.В. РУДАК¹,
Н.И. МИСЮЧЕНКО¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ВОКРУГ ТЕЛ, ЛЕТАЮЩИХ С ГИПЕРЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

Разработана модель образования плазменных областей и построена методика расчета их радиофизических свойств, на основании которых создан специализированный программный комплекс, позволяющий получить исходные данные для моделирования распространения электромагнитного излучения в заданном диапазоне частот. Расчет ионизационного состава плазмы проводится в предположении локального термодинамического равновесия с учетом ионов первой кратности ионизации.

A.V. TETEREV^{1,2}, L.K. STANCHITS¹, L.V. RUDAK¹,
N.I. MISUCHENKO¹

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus
²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia

SIMULATION OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF PLASMA FORMATIONS ARISING AROUND BODIES FLYING WITH HYPERSONIC VELOCITY

A model of the formation of plasma regions has been developed and a method for calculating their radio physical properties has been constructed, on the basis of which a specialized software complex has been created, which allows obtaining initial data for modeling the propagation of electromagnetic radiation in a given frequency range. The calculation of the ionization composition of the plasma is carried out under the assumption of local thermodynamic equilibrium with allowance for ions of the first ionization rate.

Если среда является проводящей, диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$, где ϵ' и ϵ'' - ее действительная и мнимая части. Для описания свойств среды используется также комплексный показатель преломления среды $m = m' + im''$, который определяется из условия, что его квадрат равен диэлектрической проницаемости $m^2 = \epsilon$.

Для расчета диэлектрической проницаемости воспользуемся простейшей моделью Друде, которая дает следующие выражения для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости [1, 2]:

$$\epsilon' = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}; \quad \epsilon'' = \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2},$$

где $\omega_p^2 = 4\pi n_e^2/m$ - квадрат плазменной частоты, n_e - концентрация электронов, m - масса электрона ($m = 9 \cdot 10^{-28}$ г), а ν - средняя частота столкновений электронов. Как следует из этих выражений, в интересующих нас условиях при $\omega < \omega_p$ и $\nu \ll \omega_p$ действительная часть диэлектрической проницаемости становится отрицательной и большой по абсолютной величине. При этом коэффициент отражения R оказывается почти равным 1, так что происходит практически полное отражение от плазменного слоя. Т.е. в этом случае электромагнитная волна вообще не может распространяться в плазме.

Отметим, что если имеется несколько типов частиц-рассеивателей (ионы, атомы, молекулы и др.), то частота столкновений будет находиться, как сумма частот столкновений для разных типов рассеивателей. В нашем случае существенно рассеяние электронов на атомах и ионах, т.е. $\nu = \nu_{ia} + \nu_{ea}$. Для рассеяния электронов на ионах дифференциальное сечение рассеяния имеет вид (резерфордское рассеяние):

$$\sigma(\nu, \theta) = \frac{e^4}{(2m_e \nu^2)^2 \sin^4(\theta/2)}.$$

Параметрические расчеты проводились для ряда высот от 20 до 80 км в гиперзвуковом диапазоне скоростей 2 - 8 км/с при частоте сканирования объекта 0.5 - 15 ГГц. Результаты расчетов показали, что вокруг тела образуется достаточно тонкий слой плазмы с низкой степенью ионизации. При этом на частоте радиоволны, меньшей плазменной частоты, происходит ее отражение от плазменной оболочки. За телом формируется протяженная область следа с пониженной плотностью и достаточно высокой температурой, от которой также может происходить отражение радиосигнала. Результаты наших расчетов хорошо согласуются с данными работ [3, 4] по температуре, плотности и концентрации электронов.

Список литературы

1. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. // М.: Наука, 1979. 528 с.
2. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. // М.: Наука, 1967.
3. Martin J.J. Atmospheric reentry. An Introduction to its Science and Engineering. // Prentice-hall, 1966, 268 p.
4. Tang R., Mao M., Yuan K., Wang Yu., Deng X. A terahertz signal propagation model in hypersonic plasma sheath with different flight speed // Phys. Plasmas, 26, 043509, 2019.

Э.Ф. ХАФИЗОВА, Н.А. КУДРЯШОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ОБОБЩЕННЫЕ ПОЛИНОМЫ ЭРМИТА И АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ИЕРАРХИИ БЮРГЕРСА

Рассматриваются автомодельные решения уравнений иерархии Бюргерса. С помощью обобщенных преобразований Коула-Хопфа иерархия обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений преобразуются к линейным уравнениям. Показано, что решения этой иерархии находятся с помощью обобщенных полиномов Эрмита. Найдены рациональные решения иерархии уравнений Бюргерса.

E.F. KHAFIZOVA, N.A. KUDRYASHOV

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

GENERALIZED HERMITE POLYNOMIALS AND SELF-SIMILAR OF THE BURGERS HIERARCHY

Self-similar solutions of the Burgers hierarchy are considered. The hierarchy of ordinary nonlinear differential equations is converted to linear equations using the generalized Cole-Hopf transforms. The solution of the hierarchy is a generalized form of Hermite polynomials. Rational solutions of the hierarchy of Burgers equations are found.

Уравнения иерархии Бюргерса имеют вид [1]:

$$u_t + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} + u \right)^n u = 0 \quad (1)$$

Они допускают группу преобразований растяжения, с помощью которой находятся автомодельные переменные $u = e^{-a} u'$, $x = e^a x'$, $t = e^{a(n+1)} t'$, где a – константа. Используя автомодельные переменные находятся инварианты, которые допускаются уравнениями иерархии Бюргерса. С помощью инвариантов решение каждого уравнения иерархии записывается в виде:

$$u_n(x, t) = \frac{1}{(n+1)^{\frac{1}{n+1}} t^{\frac{1}{n+1}}} f \left(\frac{x}{(n+1)^{\frac{1}{n+1}} t^{\frac{1}{n+1}}} \right) \quad (2)$$

Используя автомодельные переменные, уравнения иерархии Бюргерса преобразуются в дифференциальное уравнение n -го порядка, где искомая функция зависит только от одной переменной.

$$\left(\frac{d}{dz} + f \right)^n f - zf + k = 0, \quad (3)$$

где k – постоянная интегрирования. Используя обобщенное преобразование Коула-Хопфа [2-4], уравнение (3) запишется в виде линейного уравнения.

$$\psi_{n+m+1,z} - z\psi_{m+1,z} + k\psi_{m,z} = 0, \tag{4}$$

где $\psi_{m,z} = \frac{d^m \psi}{dz^m}$. Решение обыкновенного дифференциального уравнения ищется в виде полинома $n + 1$ степени. Подставляя полином с неопределенными коэффициентами в уравнение, переходим от линейного дифференциального уравнения к системе алгебраических уравнений $n + 1$ порядка с постоянными коэффициентами.

Вид рационального решения зависит от постоянной интегрирования, которая имеет дискретные значения, связанные по степени полинома. Для получения полиномов высших порядков необходимо проинтегрировать полученный полином. Решением уравнения (4) являются обобщенные полиномы Эрмита, имеющие вид:

$$\psi_k^n(z) = \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{k}{n+1} \rfloor} \frac{(-1)^i}{(n+1)^i i!} \frac{k!}{(k - (n+1)i)!} z^{k-(n+1)i}, \tag{6}$$

где k -дискретное значение постоянной интегрирования, а n -степень в уравнение (1). Автомодельное решение уравнений иерархии Бюргера записываются формулой:

$$f_{k+1}^n(z) = \frac{\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{k}{n+1} \rfloor} \frac{(-1)^i}{(n+1)^i i!} \frac{k!}{(k - (n+1)i)!} z^{k-(n+1)i}}{\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{k+1}{n+1} \rfloor} \frac{(-1)^i}{(n+1)^i i!} \frac{k+1!}{(k+1 - (n+1)i)!} z^{k+1-(n+1)i}} \tag{7}$$

С помощью функции (7) находятся рациональные решения уравнений иерархии Бюргера.

Список литературы

1. Burgers J.M. A mathematical model illustrating the theory of turbulence // Adv. Appl. Mech. - 1948.- P. 171-199.
2. Кудряшов Н.А. "Методы нелинейной математической физики". с. 175-185.
3. Cole J.D. On a quasi-linear parabolic equation occurring in aerodynamics // Quart. Appl. Math. - 1950.- P.225-236.
4. Hopf E. The partial differential equation $u_t = u u_x + u_{xx}$. // Commun. Pure Appl. Math. - 1950.- P.201-230.

В.В. ЦЕГЕЛЬНИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь*

**О ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ БЕКЛУНДА
ДВУХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
ВТОРОГО ПОРЯДКА ПЕНЛЕВЕ-ТИПА**

Рассмотрена система двух дифференциальных уравнений первого порядка с квадратичной нелинейностью производных неизвестных функций. Показано, что исследуемая система уравнений, с одной стороны, эквивалентна XXXIV уравнению из списка Айнса [1], а с другой стороны, нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка, решения которого обладают свойством Пенлеве. При этом прямое и обратное преобразования Беклунда для этого уравнения совпадают с парой преобразований Беклунда для уравнения XXXIV.

V.V. TSEGEL'NIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

**ON THE BACKLUND TRANSFORMATIONS OF TWO NONLINEAR
SECOND-ORDER DIFFERENTIAL
EQUATIONS OF THE PAINLEVE' TYPE**

A system of two first-order differential equations with quadratic nonlinearity of the derivative of unknown functions is considered. It is shown that the system of equations under study, on the one hand, is equivalent to the XXXIV equation from the Ince list [1], and on the other hand, to a nonlinear differential equation of the second order, the solutions of which have the Painleve' property. In this case, the direct and inverse Backlund transformations for this equation coincide with a pair of Backlund transformations for equation XXXIV.

Доклад посвящен изложению результатов исследования аналитических свойств решений системы дифференциальных уравнений

$$p_{1-b} = -p_b + \frac{(p'_b - b)^2}{2p_b^2} + t, \quad (1)$$

$$p_b = -p_{1-b} + \frac{(p'_{1-b} + b - 1)^2}{2p_{1-b}^2} + t, \quad (2)$$

в которой p_b , p_{1-b} – произвольные функции независимой переменной t ; b – произвольный параметр.

Теорема 1. Пусть p_b ($p'_b - b \neq 0$), p_{1-b} ($p'_{1-b} + b - 1 \neq 0$) – произвольные функции, удовлетворяющие системе (1), (2). Тогда при условии $p_{1-b}(p'_b - b) - p_b(p'_{1-b} + b - 1) = 0$ они являются решениями уравнений

$$2p_b p''_b = p'^2_b + 4p^3_b - 2t p^2_b - b^2, \quad (3)$$

$$2p_{1-b} p''_{1-b} = p'^2_{1-b} + 4p^3_{1-b} - 2t p^2_{1-b} - (1-b)^2 \quad (4)$$

соответственно.

Уравнение (3) с точностью до преобразования $p_b = 2\alpha w$, $b = 2\alpha$ ($\alpha \neq 0$) совпадает с уравнением XXXIV из списка Айнса [1].

Уравнение (3) инвариантно относительно замены $b \rightarrow -b$. Уравнение (4) получается из (3) заменой $b \rightarrow 1-b$. Используя формулы (1), (2) получено нелинейное функциональное соотношение, связывающее решения уравнения (3) при различных значениях параметра b . Данное соотношение можно рассматривать как принцип нелинейной суперпозиции решений уравнения (3).

Теорема 2. Пусть p_b ($p'_b - b \neq 0$), p_{1-b} ($p'_{1-b} + b - 1 \neq 0$) – произвольные функции, удовлетворяющие системе (1), (2). Тогда при условии $p_{1-b}(p'_b - b) + p_b(p'_{1-b} + b - 1) = 0$ они являются решениями уравнений

$$2p_b p''_b = 3p'^2_b - 4b p'_b + 2t p^2_b + b^2, \quad (5)$$

$$2p_{1-b} p''_{1-b} = 3p'^2_{1-b} - 4(1-b)p'_{1-b} + 2t p^2_{1-b} + (1-b)^2$$

соответственно.

Если $p_b = p(t, b)$ – решение уравнения (5), то $-p(t, -b)$ также решение этого уравнения.

Уравнение (5) в случае $b = 0$ заменой $p_b = u^{-2}$ приводится к уравнению Эйри $u'' = -\frac{t}{2}u$.

С помощью преобразований $p = b \cdot v^{-1}$ ($b \neq 0$), $v = T' \cdot T^{-1}$ и дифференцированием относительно функции T получается линейное уравнение четвертого порядка.

Теорема 3. Уравнение (5) является уравнением Пенлеве-типа. Его общее решение есть рациональная функция постоянных интегрирования.

Список литературы

1. Э.Л. Айнс. Обыкновенные дифференциальные уравнения. // ОНТИ. Харьков. 1939.

А.А. КУТУКОВ, Н.А. КУДРЯШОВ, А.С. ПРИКАЗЧИКОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ И УЕДИНЕННЫЕ ВОЛНЫ, ОПИСЫВАЕМЫЕ УРАВНЕНИЕМ БИСВАСА-АРШЕДА ДЛЯ ИМПУЛЬСОВ В СВЕТОВОДЕ С ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕМ

Рассмотрена система связанных обобщённых нелинейных уравнения Шрёдингера, описывающих распространение импульсов в световоде с двулучепреломлением. Для редукции рассматриваемой системы в переменных бегущей волны найдены ограничения на параметры модели, которые являются условиями совместности системы. При найденных ограничениях на параметры получены решения изучаемой системы в виде периодических и уединённых волн.

A.A. KUTUKOV, N.A. KUDRYASHOV, A.S. PRIKAZCHIKOVA

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

PERIODIC AND SOLITARY WAVE SOLUTIONS OF THE BISWAS-ARSHEDE EQUATION FOR PULSES IN BIREFRINGENT FIBER

The system of coupled generalized nonlinear Schrödinger equations describing the propagation of pulses in a birefringent fiber is considered. For the traveling wave reduction of the system under consideration, constraints on the parameters of the model are found. They represent the compatibility conditions of the system. Under the found constraints on the parameters, periodic and solitary wave solutions of the system are obtained.

При моделировании распространения импульсов в оптическом волокне с решетками Брэгга или с двулучепреломлением используют связанные нелинейные уравнения Шрёдингера [1, 2]. Рассмотрим известное уравнение Бисваса-Аршеда [3-5] в волноводе с двулучепреломлением [6]

$$ip_t + a_1 p_{xx} + b_1 p_{xt} + i(c_1 p_{xxx} + d_1 p_{xxt}) = i[\lambda_1 (|p|^2 p)_x + \gamma_1 (|q|^2 q)_x] + i[\theta_1 (|p|^2) + \beta_1 (|q|^2)] p_x + i[\mu_1 (|p|^2)_x + \alpha_1 (|q|^2)_x] p, \quad (1)$$

$$iq_t + a_2 q_{xx} + b_2 q_{xt} + i(c_2 q_{xxx} + d_2 q_{xxt}) = i[\lambda_2 (|q|^2 q)_x + \gamma_2 (|p|^2 p)_x] + i[\theta_2 (|q|^2) + \beta_2 (|p|^2)] q_x + i[\mu_2 (|q|^2)_x + \alpha_2 (|p|^2)_x] q. \quad (2)$$

где $q(x, t)$ и $p(x, t)$ профили импульсов, $a_j, b_j, c_j, d_j, \lambda_j, \gamma_j, \theta_j, \beta_j, \mu_j, \alpha_j$ при $j = 1, 2$, параметры модели.

После перехода в системе (1), (2) к переменным бегущей волны $q(x, t) = g(z)e^{i\varphi(x, t)}$, $p(x, t) = y(z)e^{i\varphi(x, t)}$, где $z = x - C_0 t$, $\varphi(x, t) = kx - \omega t + \theta$, получается система обыкновенных дифференциальных уравнений

$$A_1 y_{zz} + B_1 y^3 + C_1 y g^2 + D_1 g^3 + E_1 y = 0, \quad (3)$$

$$A_2 g_{zz} + B_2 g^3 + C_2 g y^2 + D_2 y^3 + E_2 g = 0, \quad (4)$$

$$A_3 y_{zzz} + B_3 y^2 y_z + C_3 g^2 y_z + D_3 g^2 g_z + E_3 y g g_z + F_3 y_z = 0, \quad (5)$$

$$A_4 g_{zzz} + B_4 g^2 g_z + C_4 y^2 g_z + D_4 y^2 y_z + E_4 g y y_z + F_4 g_z = 0, \quad (6)$$

где $A_j, B_j, C_j, D_j, E_j, F_j$, при $j = 1, 2$ новые параметры системы, зависящие от первоначальных параметров системы (1),(2). Решение системы (3)-(6) будем искать в виде $g(z) = \sigma y(z)$. Тогда после однократного интегрирования уравнений (5) и (6) и переобозначения параметров, получается переопределённая система уравнений

$$K_1 y_{zz} + L_1 y^3 + M_1 y = 0, \quad K_2 y_{zz} + L_2 y^3 + M_2 y = 0, \quad (7)$$

$$K_3 y_{zz} + L_3 y^3 + M_3 y + N_3 = 0, \quad K_4 y_{zz} + L_4 y^3 + M_4 y + N_4 = 0. \quad (8)$$

Одна из распространённых ошибок при решении систем такого вида описана в работах [5, 7] и заключается в том, что исследователи забывают про условия совместности переопределённой системы. Другая частая ошибка заключается в поиске решений уравнений системы (7),(8) при помощи методов построения точных решений, несмотря на то, что можно найти общее решение для уравнений такого типа, выраженное через эллиптические функции [8, 9].

Один из способов задать условие совместности системы (7),(8)

$$\begin{aligned} K_1 L_2 = K_2 L_1, K_1 M_2 = K_2 M_1, K_1 L_3 = K_3 L_1, K_1 M_3 = K_3 M_1, \\ K_1 L_4 = K_4 L_1, K_1 M_4 = K_4 M_1, N_3 = 0, N_4 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Другое условие совместности для системы (7),(8)

$$\begin{aligned} K_1 = 0, L_1 = 0, M_1 = 0, K_2 = 0, L_2 = 0, M_2 = 0, \\ K_3 L_4 = K_4 L_3, K_3 M_4 = K_4 M_3, K_3 N_4 = K_4 N_3. \end{aligned} \quad (10)$$

При ограничениях на параметры (9) или (10) решение системы (7),(8) выражается, например, через эллиптическую функцию Вейерштрасса [5].

Список литературы

1. Agrawal G.P. // Nonlinear Fiber Optics. Elsevier, 2019. 1–728 p.
2. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. // Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals. Elsevier, 2003. 1–540 p.
3. Biswas A., Arshed S. // Optik. 2018. Vol. 174. P. 452–459.
4. Kudryashov N.A. // Optik. 2020. Vol. 219. Art. no. 165002.
5. Kudryashov N.A. // Optik. 2020. Vol. 200. Art. no. 163442.
6. Yildirim Y. // Optik. 2019. Vol. 182. P. 810–820.
7. Kudryashov N.A. // Optik. 2020. Vol. 209. Art. no. 164522.
8. ur Rehman H. et al. // Optik. 2020. Vol. 218. Art. no.164894.
9. Zayed E.M.E., Alngar M.E.M. // Optik. 2019. Vol. 203. Art. no.163922.

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

Д.А. АБИН¹, М.А. ОСИПОВ¹, С.В. ПОКРОВСКИЙ¹,
А.С. СТАРИКОВСКИЙ¹, И.В. АНИЩЕНКО¹, С.В. ВЕСЕЛОВА¹, М.С.
НОВИКОВ², И.А. РУДНЕВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В CORC КАБЕЛЕ

Рассмотрены возможности обнаружения дефектов в CORC кабелях методами сканирующей Холловской магнитометрии и 4х контактным методом измерения с применением «магнитного ножа». Показаны и обоснованы границы эффективности каждого из методов. Сформулированы рекомендации по проектированию систем контроля качества CORC кабелей.

D.A. ABIN¹, M.A. OSIPOV¹, S.V. POKROVSKI¹,
A.S. STARIKOVSKI¹, I.V. ANISHCHENKO¹, S.V. VESELOVA¹,
M.S. NOVIKOV², I.A. RUDNEV¹

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

DEVELOPMENT OF A PROCEDURE FOR DETECTING DEFECTS IN CORC CABLE

Possibilities of detecting defects in CORC cables by the methods of scanning Hall magnetometry and the 4-contact method of measurement with the use of a "magnetic knife" are considered. The area of the effectiveness of each of the methods are shown and substantiated. Recommendations for designing quality control systems for CORC cables are formulated.

CORC кабель представляет собой многослойную структуру из большого количества высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент 2-го поколения шириной 4мм, намотанных под определённым углом и с определённым шагом на полую мельхиоровую трубку диаметром 6 мм. Поскольку изготовление такого кабеля является технологической задачей, сопряжённой с большим количеством деформаций ВТСП лент, что может привести к образованию локальных дефектов и деградации токонесущей способности, важно осуществлять контроль и отслеживать образование дефектов на всех стадиях технологического процесса: отдельных лент до изготовления кабеля, готового кабеля, кабеля после формирования готового электротехнического изделия (намотка магнита, индукционного накопителя и

т.д.). 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 магнитометрии и 4-х контактным методом измерения вольтамперной характеристики (ВАХ) с применением магнитного ножа. Все измерения проводились при температуре кипения жидкого азота. Метод сканирующей Холловской магнитометрии оказался хорошим способом обнаружения дефектов намотки в обоих режимах измерений: протекание постоянного тока и предварительное намагничивание кабеля однородным магнитным полем перпендикулярным оси кабеля. Расположение пиков в картине магнитного поля хорошо согласовалось с расположением центров ВТСП лент. Однако, методика оказалась чувствительна только к ближайшей ориентированной в сторону горизонтальной плоскости сканирования поверхности кабеля. Для получения полной информации о состоянии образца необходимо провести сканирование 4 раза, поворачивая кабель на угол 90 градусов. Также методика оказалась слабо чувствительна к локальным дефектам лент, особенно глубоко расположенным.

Концепция «магнитного ножа» заключается в создании внешнего магнитного поля на локальном участке кабеля, что приводит к уменьшению величины критического тока на данном участке. Если при этом пропускать через кабель постоянный ток близкий к критическому, то на участках кабеля с дефектами будет возникать резкий скачок напряжения. Данная методика не позволяет точно определить к какому типу относится дефект, так как размер постоянных магнитов превышал шаг намотки лент, однако с точностью до 1 см позволила определить расположение искусственно созданного дефекта. Эксперименты с применением различныхборок из постоянных магнитов показали, что методика чувствительна к глубине залегания дефекта и ориентации магнитного поля в области его расположения. Поэтому для получения полных данных о наличии дефектов приходилось поворачивать кабель вокруг оси. Для дальнейшего развития методики предлагается оптимизация конфигурации поля «магнитного ножа» за счёт компьютерного моделирования с целью создания сборки, способной определять присутствие дефекта в любом месте кабеля без его вращения, и сборки, подходящей для сканирования кабеля, уложенного в ферромагнитную катушку индукционного накопителя энергии.

Ю.В.АГРАФОНОВ, И.С.ПЕТРУШИН

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

ЛИНЕЙНОЕ ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Проведен анализ применимости алгоритмов решения различных приближений для нелинейных уравнений статистической физики жидкостей к решению линейного интегрального уравнения Фредгольма второго рода для одночастичной функции распределения, предложенного ранее для описания поверхностных явлений в жидкостях. Рассмотрена жидкость твердых сфер вблизи твердой поверхности.

YU.V. AGRAFONOV, I.S. PETRUSHIN

Irkutsk state university, Irkutsk, Russia

LINEAR INTEGRAL EQUATION OF STATISTICAL PHYSICS OF SURFACE PHENOMENA

The analysis of the applicability of algorithms for solving various approximations for nonlinear equations of statistical physics of liquids to the solution of the linear integral Fredholm equation of the second kind, proposed earlier for describing surface phenomena in liquids, is carried out. A molecular system of solid spheres bordering a solid surface is considered.

Для вычисления локальной микроструктуры граничных слоев жидкостей и термодинамических параметров необходимо знать одночастичную функцию распределения $G_1(\vec{r}_1) = \exp(-\Phi_1(\vec{r}_1) / kT + \omega_1(\vec{r}_1))$, которая определяет вероятность нахождения частицы во внешнем поле $\Phi_1(\vec{r}_1)$ вблизи точки с координатами \vec{r}_1 . Рассмотрена 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, где жидкость является пространственно-однородной. Парная корреляционная функция, определяющая данное граничное условие, должна задаваться из физических соображений. Нами проведен анализ различных приближенных интегральных уравнений пространственно-однородных макроскопических систем, оценена их методическая погрешность и предложено [1-2] линейное интегральное уравнение для одночастичного потенциала $\exp(\omega_1(z_1))$ жидкости вблизи твердой поверхности

$$\begin{aligned}
& (e^{\omega_1(z_1)} - 1) - 2\pi n \int_0^{\infty} dz_2 (e^{\omega_1(z_2)} - 1) \int_{|z_{12}|}^{\infty} r_{12} dr_{12} C_{12}(r_{12}) = \\
& = -2\pi n \int_{z_1}^{\infty} dz_{12} \int_{z_{12}}^{\infty} r_{12} dr_{12} C_{12}(r_{12})
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь учтено, что взаимодействие частиц жидкости с поверхностью осуществляется как взаимодействие твердых сфер. Отметим, что (1) 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 том случае, когда параметры уравнения вычисляются аналитически, данное уравнение также может быть решено аналитически, как например, в [1-2]. Для численного решения уравнения (1) с различными замыканиями и параметрами межмолекулярного взаимодействия необходимо предварительно вычислить ядро на основе решения уравнений статистической физики жидкостей.

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, Vol. 22, № 3, 291-302. DOI: [10.17308/kcmf.2020.22/0000](https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/0000)
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 (7), 783–787 (2020). DOI: [10.3103/S106287382007003](https://doi.org/10.3103/S106287382007003)
3. G.A. Martinov // Fundamental theory of liquids; method of distribution functions. Bristol: Adam Hilger; 1992, 470 p.
4. A.G. Vompe, G.A. Martynov // The self-consistent statistical theory of condensation // The Journal of chemical physics, 1997, 106(14), 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, 3-17. DOI: [10.1016/S0167-7322\(99\)00037-9](https://doi.org/10.1016/S0167-7322(99)00037-9)

А.К. АЙМУХАНОВ, К.С. РОЖКОВА, Д.С. КАМБАР

*Карагандинский университет им. академика Е.А. Букетова, Научный Центр
«Нанотехнологии и наноматериалов», Караганда, Казахстан*

ВЛИЯНИЕ ПАРОВ СПИРТОВ НА МОРФОЛОГИЮ ПЛЕНОК PEDOT:PSS ПРИ ОТЖИГЕ В ИНЕРТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Для изменения морфологии поверхности полимер с дырочной проводимостью PEDOT:PSS разбавляли определенной концентрацией спирта (этиловый, изопропиловый). Преимущества свойств модифицированной пленки PEDOT:PSS были определены путем сравнения структуры и морфологии поверхности. Установлено, что добавление различной концентрации спиртового растворителя в процессе приготовления пленки приводит к уменьшению шероховатости поверхности пленки в 1,1 и 1,5 раза.

A.K. AIMUKHANOV, X.S. ROZHKOVA, D.S. KAMBAR

*Buketov University. Scientific Center «Nanotechnology and Nanomaterials», Qaraghandy,
Kazakhstan*

EFFECT OF ALCOHOL VAPORS ON THE MORPHOLOGY OF PEDOT: PSS FILMS DURING ANNEALING IN AN INERT ATMOSPHERE

To change the surface morphology, the hole-conducting polymer PEDOT: PSS was diluted with a certain concentration of alcohol (ethyl, isopropyl). The property benefits of the modified PEDOT:PSS film were determined by comparing the structure and surface morphology. It was found that the addition of various concentrations of an alcoholic solvent during the preparation of the film leads to a decrease in the roughness of the film surface by 1.1 and 1.5 times.

Подготовка подложек осуществлялась согласно методике [1]. В работе использовали PEDOT:PSS (1%, Ossila A14083), Izopropanol, Ethanol (pure 99,9% Sigma Aldrich). Перед началом экспериментов раствор PEDOT:PSS фильтровали через 0,45 микрометровый фильтр. Пленки PEDOT:PSS получали на поверхности кварцевого стекла методом центрифугирования (на центрифуге SPIN150i производства компании Semiconductor Production System) при скорости вращения 5000 об/мин.

На рисунке 1 приведены снимки морфологии поверхности пленок PEDOT:PSS после выдерживания в парах этилового и изопропилового спиртов в соотношении 50/50%. Из рисунка видно, что пленка PEDOT:PSS имеет неоднородную структуру поверхности с шероховатостью 0,65 нм. В таблице 1 приведены значения шероховатости поверхности.

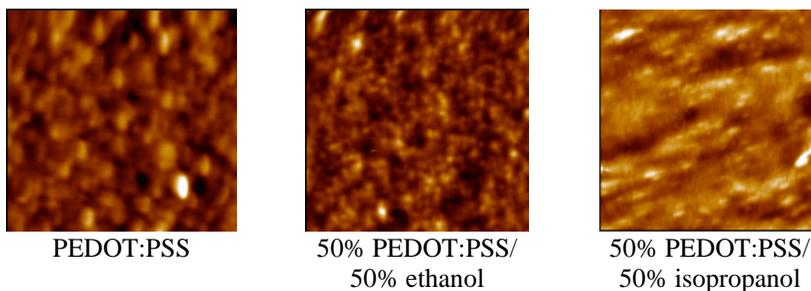


Рис. 1. Снимки морфологии поверхности пленок PEDOT:PSS

При выдерживании пленки полимера PEDOT:PSS в парах этилового спирта в инертной атмосфере происходит сглаживание поверхности. Шероховатость пленки уменьшилась и составила величину 0,58 нм.

Таблица 1 – Шероховатость поверхности плёнок PEDOT:PSS в парах с разной концентрацией спиртов при отжиге в инертной атмосфере

Образец	R _a , нм
PEDOT:PSS	0,65
50% PEDOT:PSS/50% ethanol	0,58
50% PEDOT:PSS/50% isopropanol	0,43

При выдерживании пленки в парах изопропилового спирта шероховатость пленки PEDOT:PSS составила значение 0,43 нм. Таким образом, полученные результаты показали, что наименьшая шероховатость поверхности пленки получается при отжиге в парах изопропилового спирта.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08856176).

Список литературы

1. Kim K., Ihm K., Kim B. // Surface Property of Indium Tin Oxide (ITO) After Various Methods of Cleaning // Acta Physica Polonica A, 2015, Vol. 127, № 4, 1176-1179. DOI: [10.12693/APhysPolA.127.1176](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.1176)

Н.М.-Р. АЛИХАНОВ^{1,2}, М.Х. РАБАДАНОВ¹,
С.А. САДЫКОВ¹, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹, М.В. ИЛЬИЧЕВ³,
Р.М. ЭМИРОВ¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

³Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОПОРОШКОВ BiFeO_3 , ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Исследованы магнитные свойства нанопорошков составов BiFeO_3 , термообработанных при температурах 450 °С, 550 °С, 600 °С и 650 °С. Исходные нанопорошки синтезированы золь-гель методом. Установлено, что с увеличением размера кристаллитов (D) в ~ 1.9 раза величины намагниченности насыщения (M_s) и остаточной намагниченности (M_r) уменьшается ~ 8.1 и 4.1 раза соответственно, а коэрцитивная сила (H_c), наоборот, увеличивается ~ 1.8 раза. Значение M_s для образца, термообработанного при 650 °С с $D \sim 74.8$ нм уменьшилось до ~ 0.23 emu/g.

N.M.-R. ALIKHANOV^{1,2}, M.KH. RABADANOV¹, S. A. SADYKOV¹,
S.KH. GADZHIMAGOMEDOV¹, M.V. ILYICHEV³, R.M. EMIROV¹

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

MAGNETIC PROPERTIES OF BiFeO_3 NANOPOWDERS HEAT-TREATED AT DIFFERENT TEMPERATURES

The magnetic properties of BiFeO_3 nanopowders heat-treated at temperatures of 450 °С, 550 °С, 600 °С, and 650 °С have been investigated. The original nanopowders were synthesized by the sol-gel method. It was found that with an increase in the crystallite size (D) by ~ 1.9 times, the saturation magnetization (M_s) and remanent magnetization (M_r) decrease ~ 8.1 and 4.1 times, respectively, and the coercive force (H_c), on the contrary, increases ~ 1.8 times. The M_s value for the sample heat treated at 650 °С and with $D \sim 74.8$ nm decreased to ~ 0.23 emu/g.

Феррит висмута (BiFeO_3) один из немногих мультиферроиков, в котором сегнетоэлектричество и антиферромагнетизм сосуществуют в одной фазе с экстремально высокими температурами упорядочений (температура Кюри $T_C \sim 830$ °С и температура Нееля $T_N \sim 370$ °С). Для решения проблем, ограничивающих практическое применение материалов BiFeO_3 , наиболее эффективным методом принято считать синтез беспримесного наноструктурированного BiFeO_3 . В работе золь-гель методом [1] синтезированы порошки состава BiFeO_3 и приведены результаты исследования магнитных свойств. Термообработка

исходного порошка осуществлялась при температурах 450°C, 550°C, 600°C и 650°C. Этот метод [1] позволил получить образцы с минимальным содержанием вторичных фаз.

Петли магнитного гистерезиса ($M-H$) синтезированных наночастиц BiFeO_3 и прокаленных при различных температурах показаны на рисунке 1а. Все образцы демонстрируют сильный ферромагнитный характер, достигающий насыщения. Величина M_s резко уменьшается с 1.91 emu/g до 0.24 emu/g с увеличением размера D (рисунок 1б). Значения M_s , M_r и H_c показаны в таблице.

Образец	D (нм)	M_s (emu/g)	M_r (emu/g)	H_c (Oe)
Исходный	39.6	1.91	0.057	42.90
450 °C	42.0	1.20	0.047	58.01
550 °C	45.7	0.71	0.033	57.07
600 °C	56.3	0.44	0.023	53.85
650 °C	74.8	0.24	0.014	76.41

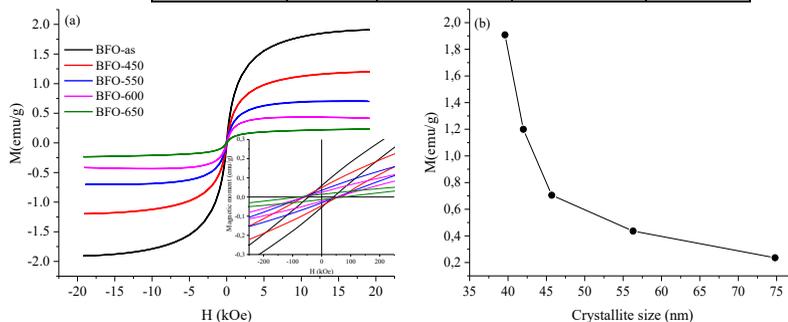


Рис. 1.

Зависимость $M-H$ и магнитного момента от размера кристаллитов

Остаточная намагниченность непрерывно уменьшается с увеличением размера кристаллитов, а значения коэрцитивного поля увеличиваются. Однако наблюдается небольшое снижение значений H_c для образцов, прокаленных в интервале температур 450-600°C.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 20-08-00242А, частично государственным заданием FZNZ-2020-0002.

Список литературы

1. С.А. Садыков, Д.К. Палчаев, Ж.Х. Мурлиева, Н.М.-Р. Алиханов, М.Х. Рабаданов, С.Х. Гаджимагомедов, С.Н. Каллаев // Ас-электропроводность керамики BiFeO_3 , полученной методом искрового плазменного спекания нанопорошка // Физика твердого тела, 2017, вып. 9, 1747-1753. DOI: [10.21883/FTT.2017.09.44845.023](https://doi.org/10.21883/FTT.2017.09.44845.023)

Д.В. АЛҲАББЕВ, И.Д. ЯДГАРОВ, У.Б. УЛЖАЕВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз,
Ташкент, Узбекистан*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТОРЦЕВОГО РАССЕЯНИЯ АТОМОВ ВОДОРОДА НА ПУЧКАХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Приведены результаты численного моделирования процессов торцевого рассеяния низкоэнергетических атомов водорода на пучках углеродных нанотрубок на графитовой подложке. Результаты модельных экспериментов показывают возможность контроля локализации атомов водорода внутри углеродных нанотрубок.

D.V. ALYABEV, I.D. YADGAROV, U.B. ULJAEV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov, Uzbekistan Academy
of Sciences, Tashkent, Uzbekistan*

SIMULATION OF THE PROCESSES OF FACE SCATTERING OF HYDROGEN ATOMS ON BUNDLES OF CARBON NANOTUBES

The results of numerical simulation of the processes of face scattering of low-energy hydrogen atoms on carbon nanotube beams on graphite substrate are presented. Results of model experiments show that it is possible to control the localization of hydrogen atoms inside carbon nanotubes.

Как показывают ряд работ (к примеру, [1]), углеродные нанотрубки с инплантированными атомами внутри, имеют специфические свойства, имеющие практический интерес. По этим причинам, рассмотрение процессов рассеяния атомов на углеродных нанотрубках представляют интерес как способ их модификации.

Мы рассматриваем процесс торцевого рассеяния идеально сколламированного пучка атомов водорода на пучке углеродных нанотрубок на графитовой подложке (диаметром около 10 А и длиной 96 А, графитовая подложка состоит из трех графеновых слоев с расстоянием 3 ангстрема между ними, в соответствии расстоянию между слоями в реальном графите, рисунок 1). За основу описания взаимодействий, нами был выбран потенциал Бреннера [1], который является частным случаем потенциала Терсоффа, параметризованного для углеводородных взаимодействий. В общем случае, этот потенциал хорошо описывает межатомное взаимодействие в структурах с ковалентными связями.

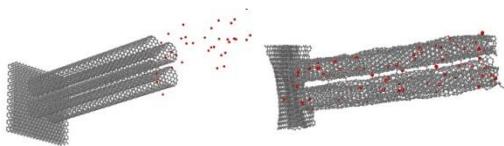


Рис. 1. Пучок нанотрубок на графитовой подложке (слева), атомы водорода, инкапсулированные внутри нанотрубок (справа)

Ниже приведены результаты модельных экспериментов по торцевому рассеянию атомов водорода на этой структуре. Энергия рассеиваемых атомов лежала в пределах 15-20эВ, а значения углов рассеяния пучка лежали в интервале 3-9 градусов от нормали. Выбор углов рассеяния определился тем, что для больших углов рассеяния, процесс каналирования атомов внутри, с последующей их инкапсуляцией, не так выражен. Ниже приведен график распределения инкапсулированных атомов внутри нанотрубок (рисунок 2). На графике представлены послойные распределения инкапсулированных атомов (для энергий рассеиваемых атомов 15 и 20 эВ/атом и различных углов).

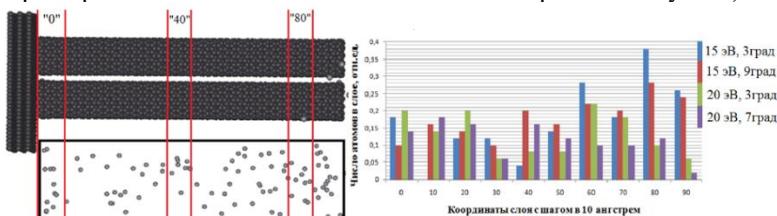


Рис. 2. Распределение инкапсулированных атомов внутри нанотрубок.

Как видно из графиков, более равномерное распределение инкапсулированных атомов можно получить при более высоких значениях энергии. Для более низких значений энергии, наблюдается рост инкапсулированных атомов у начала трубки, где происходит рассеяние. Однако доля инкапсулированных атомов с более низкими энергиями выше (42% для 15эВ по всем выбранным углам против 32% для энергии в 20эВ).

Список литературы

1. D.W. Brenner, O.A. Shenderova, J.A. Harrison, S.J. Stuart, N. Boris, S.B. Sinnott // Journal of Physics: Condensed Matter, 2002, Vol. 14, № 4, 783-802. DOI: [10.1088/0953-8984/14/4/312](https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/4/312)
2. K.V. Agrawal S. Shimizu, L.W. Drahushuk, D. Kilcoyne, M.S. Strano // Nature nanotechnology, 2017, 12, 267-273. DOI: [10.1038/nnano.2016.254](https://doi.org/10.1038/nnano.2016.254)

И.В. АНИЩЕНКО, С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРОНТА ПРОНИКНОВЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ВТСП КОМПОЗИТЫ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ И ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ

В данной работе представлены результаты комплексного мультифизического моделирования процессов проникновения магнитного потока при импульсном токовом и магнитном воздействии. При моделировании неравновесных состояний, спровоцированных токовым воздействием, управление переключением осуществляется с помощью самостоятельного или дополнительного импульса тока плотностью $J > J_c$ или синхронного току импульса магнитного поля от 0.1 до 2Т. Проведена экспериментальная верификация FEM модели для коротких ($< 3\text{мс}$) и длинных ($> 3\text{мс}$) импульсов тока.

I.V. ANISHCHENKO, S.V. POKROVSKII, I.A. RUDNEV

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

MODELING OF THE DYNAMICS OF THE MAGNETIC FLUX PENETRATION FRONT INTO HTS COMPOSITES UNDER PULSED MAGNETIC AND CURRENT LOADS

This paper presents of complex multiphysical modeling results of nonequilibrium states arising in high-temperature superconducting composites under the pulsed current and magnetic impact. When simulating nonequilibrium states provoked by the current pulses, the switching is controlled by an substantive or additional current pulse with a density $J > J_c$ or a magnetic field pulse synchronous to the current from 0.1 to 2T. An experimental verification of the FEM model for short ($< 3\text{ms}$) and long ($> 3\text{ms}$) current pulses was carried out.

В современных системах коммутации высокотемпературные композиты приходят на смену традиционным низкотемпературным сверхпроводникам и зачастую являются неотъемлемой частью таких устройств, как сверхпроводящие накопители энергии [1], токоограничители [2], МРТ томографы [3]. Переключение ВТСП ключа в таких системах происходит посредством генерации неравновесных состояний, как правило, при импульсном токовом, магнитном или локальном тепловом воздействии [4]. В случае импульсных токовых воздействий переход из сверхпроводящего в резистивное состояние обусловлен превышением критического тока сверхпроводника. Моделирование неравновесных состояний, возникающих в сверхпроводниках при одиночном или комбинированном токовых воздействиях, необходимо для проектирования, оптимизации и конструирования переключающих устройств сверхпроводящей

электроники, систем накопления и передачи электроэнергии и улучшения их энергоэффективности. Особенно важной задачей является численное исследование процессов переключения ВТСП композитов в различных температурных режимах работы и подбор параметров охлаждения системы для достижения минимального времени коммутации без деградации токонесущей способности ВТСП элементов. Особенно это относится к системам, в которых в качестве хладагента используется жидкий азот. Численный анализ таких систем достаточно затруднителен ввиду гистерезисного характера кривой кипения жидкого азота и возможностью многократной смены режимов кипения LN₂ при неравновесных условиях работы ВТСП элементов. Выполнено моделирование и анализ динамики электрофизических процессов, происходящих в слоистой структуре ВТСП композитов с учетом влияния локальных термических процессов в структуре композита, в частности, при наличии неоднородностей критического тока сверхпроводящего слоя. Времена переключения ВТСП композита из сверхпроводящего в нормальное состояние исследованы для различных амплитуд токовых импульсов и различных времен нарастания фронта воздействия. Проведена экспериментальная верификация численной модели. Показано, что при эффективном охлаждении локальные всплески тепловыделения могут быть успешно отведены жидким хладагентом или быть скомпенсированы криогенным оборудованием, в таком случае, нет принципиальных ограничений по использованию токов, существенно превышающих критический ток ВТСП. Проведен расчет зависимости скорости переключения ВТСП в нормальное состояние от длительности импульсных нагрузок, которая зависит от соотношения скорости распространения тепла, выделившегося на сверхпроводнике и приводящего к снижению критического тока, и длительности импульса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90144.

Список литературы

1. K. Sawa et al. // Electrical Contacts, 2001. Proceedings of the Forty-Seventh IEEE Holm Conference on. IEEE, 2001, 128–133
2. Dong Keun Park et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, Vol. 19, № 3, 1896–1899. DOI: [10.1109/TASC.2009.2018069](https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2018069)
3. S.B. Kim et al. // Physics Procedia, 2015. Vol. 65, 149–152. DOI: [10.1016/j.phpro.2015.05.088](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.05.088)
4. H. Zhang et al // Superconductor Science and Technology, 2016 Vol. 30, № 2.

И.В. АНИЩЕНКО^{1,2}, С.В. ПОКРОВСКИЙ^{1,2}, И.А. РУДНЕВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Научно-технологический университет «Сириус», Сочи, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА В НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЯХ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ

В данной работе представлены результаты моделирования магнитного подвеса на основе ВТСП лент второго поколения в неоднородных магнитных полях различных конфигураций. В частности, рассмотрено поведение стопок 2G ВТСП лент GdBaCuO в магнитном поле сборки Халлбаха, состоящей из пяти NeFeB магнитов, а также в магнитном поле сборки, состоящей из пяти таких же магнитов, одноименные полюсы которых направлены в одну сторону. Моделирование методом конечных элементов (FEM) выполнено с использованием H-формализма для FC и ZFC режимов охлаждения. Модель ориентирована на левитационное приложение и может быть использована для комплексного расчета широкого спектра левитационных систем.

I.V. ANISHCHENKO^{1,2}, S.V. POKROVSKII^{1,2}, I.A. RUDNEV^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI, Russia

²Sirius University of Science and Technology, Sochi, Russia

MODELING A MAGNETIC SUSPENSION IN INHOMOGENEOUS FIELDS OF DIFFERENT CONFIGURATIONS

In this paper, the results of modeling of the magnetic support based on second-generation HTS tapes in inhomogeneous magnetic fields of various configurations are presented. In particular, the behavior of 2G HTS GdBaCuO tapes stacks in the magnetic field of a Hallbach assembly consisting of five NeFeB magnets, as well as in the magnetic field of an assembly consisting of five of the same magnets with the same poles directed in one direction, is considered. Finite element simulation (FEM) is performed using the H-formulation for FC and ZFC cooling modes. The model is focused on levitation application and can be used for complex calculation of a wide range of levitation systems.

В настоящее время в промышленно развитых странах (Япония, Германия, Китай, Бразилия и др.) активно ведутся работы по созданию новых типов высокоскоростных транспортных систем (ВТС) на магнитных подвесах различных типов. Важнейшей частью перспективных ВТСП являются бесконтактные подвесы. Исследования показали, что при скоростях движения свыше 300-400 км/ч необходимо отказаться от использования колесного транспорта, так как аэродинамическое сопротивление начинает превышать силу тяги ведущих колесных пар. Известно, что подвижные силовые опоры и подвесы (механические, газодинамические, электромагнитные, магнитные ВТСГТ опоры и др.) широко используются в подавляющем большинстве устройств

современной науки и техники. Наиболее развитыми в настоящее время являются механические опоры, составляющие основу современного транспорта и общего машиностроения. Расчет магнитных и левитационных систем на основе стопок 2G ВТСП лент и точная оценка их электромагнитного поведения позволяет проектировать и оптимизировать устройства для максимально эффективной работы. Численное моделирование методом конечных элементов является мощным инструментом оценки. В данной работе представлены результаты моделирования магнитного подвеса на основе ВТСП лент второго поколения в неоднородных магнитных полях различных конфигураций. В частности, рассмотрено поведение стопок 2G ВТСП лент GdBaCuO в магнитном поле сборки Халлбаха, состоящей из пяти NeFeB магнитов, а также в магнитном поле сборки, состоящей из пяти таких же магнитов, одноименные полюсы которых направлены в одну сторону. Моделирование методом конечных элементов (FEM) выполнено с использованием Н-формализма для FC и ZFC режимов охлаждения. Модель ориентирована на левитационное приложение и может быть использована для комплексного расчета широкого спектра левитационных систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51012.

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

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

²Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ АНСАМБЛЕЙ ВЫСОКООТРАЖАЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В работе рассмотрен метод получения высокотражающих наночастиц с применением микросекундных лазерных импульсов. В качестве высокотражающего материала использовалась медная мишень. Лазерный источник представлял собой твердотельный перестраиваемый лазер генерирующий микросекундные лазерные импульсы. Основная длина волны генерация составляла 750 нм. Проведены первые экспериментальные исследования как по изучению процесса формирования коллоидного раствора, так и изучению энергетических параметров в зависимости от режима работы лазера и частоты генерации излучения.

A.A. ANTIPOV, A.G. PUTILOV, A.V. OSIPOV, A.E. SHEPELEV

¹ILIT RAS – Branch of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Shatura, Russia

²Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai
Grigorievich Stoletovs, Vladimir, Russia

METHODICAL ERRORS CAUSED BY SUPERPOSITION OF ELECTRICAL AND OPTICAL SIGNALS IN A HETERODYNE LASER INTERFEROMETER

The paper considers a method for producing highly reflective nanoparticles using microsecond laser pulses. A copper target was used as a highly reflective material. The laser source was a solid-state tunable microsecond laser. The main lasing wave-length was about 750 nm. Experimental research have been realized both to study the process of the formation of a colloidal solution and to study the energy parameters depending on the operating mode of the laser and its radiation generation frequency.

Развитие аддитивных, медицинских технологий напрямую связано с производством, синтезом наноструктурированных материалов. Наноструктурированные материалы обладают уникальным набором физико-химических свойств. [1]. Перспективными материалами являются, например, Cu, Ag, Au, которые обладают высокой теплопроводностью и высокой отражающей способностью при воздействии лазерного излучения порядка 1 мкм. Поэтому изучение процесса взаимодействия лазерного излучения ближнего ИК-

диапазона спектра является не только актуальной, но и фундаментальной задачей.

Для формирования высокоэнергетического пучка был разработан и создан твердотельный перестраиваемый лазер ближнего ИК-диапазона спектра. Данный лазер работает в импульсно-периодическом режиме миллисекундной длительности на основной длине волны 750нм [2].

Формирование коллоидных растворов осуществлялось с применением метода лазерной абляции материала в жидкость. В кювету с жидкой средой помещалась медная мишень. Лазерное излучение длительностью порядка 125мкс фокусировалось на границу раздела мишень-жидкая среда. Импульсная плотность мощности на мишени составляла порядка 8МВт/см². Данное воздействие приводило к формированию коллоидного раствора с наночастицами. Гистограмма распределение частиц и принципиальная схема лазерного синтеза представлена на рисунке.

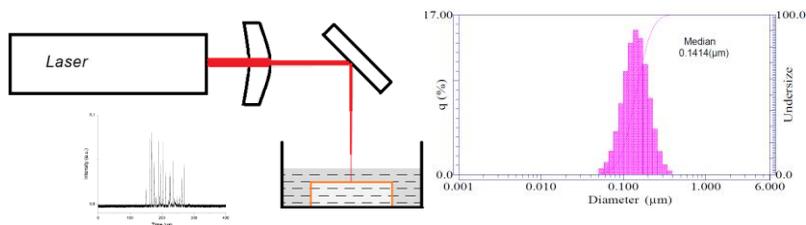


Рис. 1. Принципиальная схема лазерного эксперимента и гистограмма распределения частиц

В результате данного воздействия происходит формирование наночастиц меди со средним размером 141нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-10022, частично в рамках проектов РФФИ № 20-02-00515 и № 20-32-90052.

Список литературы

1. S.K. T. Pal // Intersurface coupling effect on the surface plasmon resonance of gold nanoparticles: from theory to applications // Chem. Rev., 2007, Vol. 107, № 11, 4797–4862. DOI: [10.1021/cr0680282](https://doi.org/10.1021/cr0680282)
2. A.A. Antipov., A.G. Putilov, A.V. Osipov, A.E. Shepelev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2020, Vol. 84, № 11, 1359-1361. DOI: [10.3103/S1062873820110052](https://doi.org/10.3103/S1062873820110052)

М.Н. АНТОНЮК, К.А.КУПЦОВ, А.Н. ШЕВЕЙКО,
Д.В. ШТАНСКИЙ

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва,
Россия*

КОРРОЗИОННЫЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Fe-Co-Cr-Ni-Cu В МОРСКОЙ ВОДЕ

В судостроении и на объектах морской инфраструктуры широко используются закаленные высокопрочные конструкционные стали с умеренной коррозионной стойкостью. Характерным примером является сталь 30х13. Данная сталь используется для изготовления валов, осей, деталей насосов, лебедок, шкивов и др. Условия эксплуатации не позволяют применять коррозионно-стойкие стали аустенитного класса из-за недостаточной прочности. Предложенные высокоэнтропийные покрытия Fe-Co-Cr-Ni-(Cu) предназначены для защиты поверхности от коррозионного и трибокоррозионного воздействия в морской воде. Трибокоррозионные испытания проводили в оригинальной трехэлектродной ячейке, позволяющей фиксировать изменения потенциала поверхности в дорожке износа. Описаны особенности и механизм трибокоррозионного поведения покрытий. Показано, что покрытия обладают высокой коррозионной стойкостью на уровне аустенитных коррозионно-стойких сталей, низким коэффициентом трения и в несколько раз меньшей скоростью износа.

M.N. ANTONYUK, K.A.KUPTSOV, A.N.SHEVEYKO,
D.V.SHTANSKY

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

CORROSION AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Fe-Co-Cr-Ni- Cu COATINGS IN SEA WATER

In shipbuilding and port infrastructure, hardened high-strength structural steels with moderate corrosion resistance are widely used. A typical example is steel 30x13. This steel is used for the manufacture of shafts, axles, pump parts, winches, pulleys, etc. Operating conditions do not allow the use of corrosion-resistant steels of the austenitic class due to insufficient strength. The proposed high-entropy coatings Fe-Co-Cr-Ni-(Cu) are designed to protect the surface from corrosive and tribo-corrosive processes in seawater. Tribocorrosion tests were carried out in an original three-electrode cell, which makes it possible to record changes in the surface potential in the wear track. The features and mechanism of tribocorrosion coating behavior are described. It is shown that the coatings have high corrosion resistance at the level of austenitic corrosion-resistant steels and, at the same time, several times lower wear rate, with a significantly lower coefficient of friction.

Для улучшения трибокоррозионных характеристик стальных изделий, применяющихся в судостроении и на объектах морской инфраструктуры,

используют покрытия, которые обладают высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью.

В данной работе методом импульсного электроискрового осаждения с использованием электродов Co-Cr-Ni и Co-Cr-Ni-Cu получены высокоэнтропийные покрытия Fe-Co-Cr-Ni-(Cu). Были подобраны режимы, обеспечивающие нанесение покрытий без трещин и пор.

Структура, элементный и фазовый состав покрытий были изучены методами сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа S-3400N (Hitachi), оснащённого энергодисперсионным детектором NORAN, и рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра D8 Advance (Bruker). Структура покрытия Fe-Co-Cr-Ni-(Cu) представляла однофазный твердый раствор Fe-Cr-Ni-Co-(Cu) с ГЦК решеткой.

Электрохимические измерения проводились с использованием потенциоста «VoltalabPST050» в искусственной морской воде, приготовленной в соответствии со стандартом ASTM D1141-98. Трибокоррозионные испытания проводили на машине трения «CSM Instruments», оборудованной оригинальной вращающейся трехэлектродной ячейкой, что позволяло одновременно с измерением коэффициента трения измерять электрохимический потенциал. Условия испытаний: схема «шарик-диск», нагрузка 5 Н, среда -искусственная морская вода, шарик из Al₂O₃.

Высокоэнтропийные покрытия Fe-Cr-Ni-Co-(Cu) показали высокую стойкость к трибокоррозии и позволили на порядок повысить износостойкость по сравнению со стальной подложкой. По сравнению со сталью 30X13 коэффициент трения снизился с 0,45 до 0,3. В условиях трибокоррозии за счёт удаления пассивной плёнки происходит значительный сдвиг потенциала в отрицательную сторону, причем у покрытий Fe-Co-Cr-Ni он значительно ниже, чем у стали. В стационарных условиях покрытия также показали более высокую коррозионную стойкость. Плотность тока коррозии составила 420 нА/см² для стали 30X13 и 60 мА/см² для покрытия Fe-Co-Cr-Ni.

Работа была выполнена в рамках проекта РФФ №20-79-10104.

И.В. АНТОНОВА^{1,2}, М.Б.ШАВЕЛКИНА³, А.И. ИВАНОВ¹,
Р.А. СООТС¹, П.П. ИВАНОВ³

¹Институт физики полупроводников им. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

КОМПОЗИТЫ PEDOT:PSS: ГРАФЕН, СИНТЕЗИРОВАННЫЙ В ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЯХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Мы показали, что тонкие (от монослоя до 2 нм), синтезированные в плазменные хлопья графена, обладают хорошей проводимостью и могут быть использованы для суспензии на водной основе или с композитом PEDOT: PSS для создания структур с использованием технологий 2D-печати.

I.V.ANTONOVA^{1,2}, M.B. SHAVELKINA³, A.I. IVANOV¹,
R.A.SOOTS¹, P.P. IVANOV³

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk., Russia

³Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

COMPOSITES PEDOT:PSS: PLASMA JET GRAPHENE FOR ELECTRONIC APPLICATIONS

We show that the fine (from a monolayer to 2 nm) synthesized in the plasma jet graphene flakes have good conductivity and might be used for a water-based suspension or with the PEDOT:PSS composite to create the structures employing the 2D printing technologies.

Гибкая электроника – это динамично развивающееся направление мировых исследований. На основе ее технологий можно производить широкий спектр электронных элементов, а сами производственные процессы при этом намного проще и дешевле, чем в случае кремниевой электроники. Использование графеновых чернил в качестве материалов гибкой электроники позволило сделать ее более эффективной благодаря низкой стоимости, простоте обработки графена, более высокой его проводимости и гибкости. Основная проблема создания графеновых чернил для 2D-печати связана с трудностью получения монослойных частиц, чтобы их толщина составляла несколько нанометров. Среди способов синтеза таких частиц, основанных на подходе «снизу-вверх», наиболее контролируемым является применение плазмотронов. Малая толщина (от монослоя до 2 нм) и высокая проводимость слоев, полученных из свободно ориентированных частиц, является одним из важных и привлекательных параметров этого материала. В данной работе рассмотрены

перспективы использования графеновых частиц, синтезированных при конверсии в гелиевой плазме пропан-бутановой смеси в качестве прекурсора углерода, для создания проводящих слоев методом печатных технологий. С использованием синтезированных чешуек были изготовлены суспензии: на водной основе и с PEDOT:PSS[поли(3,4-этилендиокситиофен) в смеси с полистиролсульфонатом]. Спомощью технологий 2D-печати на гибкую подложку были нанесены слои из этих двух суспензий (рис.1). Слои композита графен: PEDOT: PSS имеют особенно хорошую структуру. Сопротивление слоев относительно толстых слоев композита, полученного каплями, составляет 600-800 Ом/кв для пленки субмикронной толщины и 1,4-2,6 кОм/кв для тонкой пленки (около 200 нм). Сопротивление слоев толщиной ~ 350-500 нм, созданных методом 2D-печати на полиэтилентерефталате составляло 70-430 Ом/кв, значительно ниже, чем у чешуек графена, образовавшихся при расслоении графита. В целом, хорошее структурное качество, низкое сопротивление слоя, достаточно высокая подвижность носителей и хорошая механическая прочность в сочетании с возможностью получения большого количества графенового порошка и возможностью управления параметрами синтезированных частиц делают этот материал перспективным. Прежде всего, для резистивных датчиков. Наши результаты способствуют непосредственной интеграции графеновых структур в технологию 2D-печати для наноэлектроники, сенсоров, биомедицинских и оптоэлектронных компонентов и наноустройств.

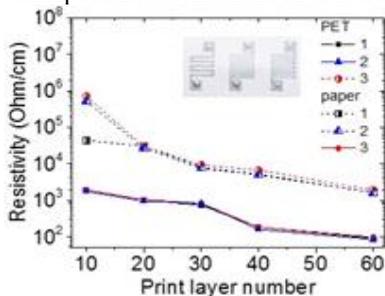


Рис. 1. Зависимость сопротивления структур на PET и бумажном носителе от количества напечатанных слоев

Работа выполнена при поддержке РФФ-2020-0017 и гранта РФФИ 19-08-00081.

Б.А. БАЙТИМБЕТОВА^{1,2}, Ю.А. РЯБИКИН¹, А. КЫДЫРБАЙ²

¹*Satpayev университет, Физико-технический институт, Алматы, Казахстан*

²*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАФЕНОВЫХ СТРУКТУР

В работе приведена методика получения графеновых структур путем воздействия органических растворителей на графитовые структуры для расслоения их плоскостей спайности с использованием ультразвукового поля. Проведены исследования структурных особенностей методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, ЭПР и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения.

В.А. ВАЙТИМБЕТОВА^{1,2}, Yu.A. RYABIKIN¹, A. KYDYRBAY²

¹*Satpayev University, Physical and Technical Institute, Almaty, Kazakhstan*

²*al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

STUDY OF PROCESSES OF FORMATION OF GRAPHENE STRUCTURES

The research work presents a technique for obtaining graphene structures by the action of organic solvents on graphite structures to separate their cleavage planes using an ultrasonic field. Structural features were studied by Raman spectroscopy, EPR and high-resolution transmission electron microscopy.

Уникальные свойства графеновых плёнок делают их перспективным материалом для использования в микро- нано- и оптоэлектронике, в энергетике, медицине, для создания катализаторов, и в других сферах деятельности человека [1].

В работе представлен способ получения графеновых структур, который обеспечивает сохранность структуры монослоев исходного графита и исключает процессы их кислородного окисления. В качестве растворителей были взяты перекись водорода, керосин, толуол и бензол как наиболее предпочтительные в процессе химического разрушения наиболее слабых связей между слоями в графитовых структурах. Облучение исходных образцов проводилось в течение 10 мин, 20 мин, 30 мин, 40 мин и 50 мин. Структурные исследования проводились на электронном микроскопе JEM-100CX с разрешением по линиям 2 Å фирмы JEOL (Япония). В качестве эффективного метода экспериментального исследования полученного материала хорошо себя зарекомендовал метод комбинационного рассеяния света (КРС), позволяющий определять не только число слоёв, но также взаимное расположение слоёв в графеновой структуре. Полученные структуры исследовались на приборе МТ-

MDT Ntegra Spectra при комнатной температуре. Спектры возбуждались полупроводниковым лазером ($\lambda=473$ нм). В ЭПР-спектроскопии в качестве вторичного образца часто используются ионы двухвалентного марганца в решетке окиси магния (Mn^{2+} в MgO). На рисунке 1 приведен КРС спектр образцов, полученных с бензолом в ультразвуковом поле.

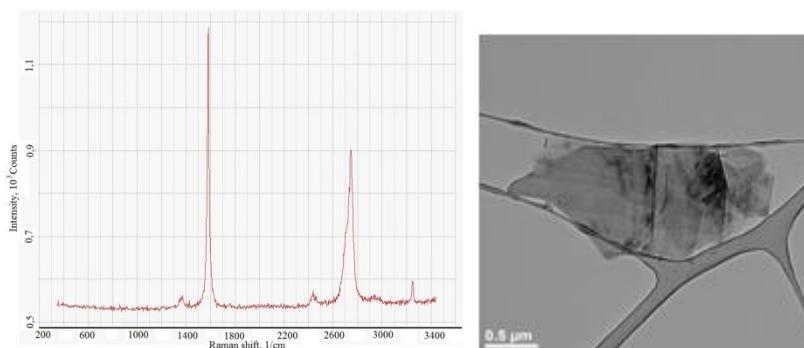


Рисунок 1- Спектр КРС (слева) и снимок ПЭМ (справа) графита с бензолом после обработки их ультразвуком в течение 20 мин.

С увеличением времени обработки графита с бензолом ультразвуковым полем происходит увеличение числа графеновых структур.

В материале образца, обработанном ультразвуком 20 мин, на снимках ПЭМ видны муаровые полосы [2], которые соответствуют наложению нескольких графеновых структур и пластинок, содержащих собственную структуру (рисунок 1).

Электронный парамагнитный резонанс является перспективным и чувствительным методом для исследования углеродных наноструктур [3]. Спектры ЭПР образцов, обработанных в бензоле, перекиси водорода и керосине имеют некоторые общие черты и g -факторы ($g=2.00414$ и $g=2.0031$) характерно для спектра ЭПР графена и его соединений, обусловленные углеродными нанотрубками.

Список литературы

1. Geim A.K., Novoselov K.S. //Nature Materials. 2007. -V6 (3). -P. 183–191.
2. Luican A., Li Guohong, *et al.* // Phys. Rev. Lett., 2011. Vol. 106. -P. 126802-4.
3. Пивень Н.П., Мурадян В.Е., и др. //Химия высоких энергий. 2010. Т 44(4), С. 380–1

П.И. БЕЗОТОСНЫЙ, К.А. ДМИТРИЕВА, С.Ю. ГАВРИЛКИН,
А.Н. ЛЫКОВ, А.Ю. ЦВЕТКОВ

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

ОБОБЩЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПЛЕНОК И ИХ ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

В работе предложен подход к моделированию сверхпроводящего состояния неоднородных сверхпроводящих пленок в рамках теории Гинзбурга-Ландау (ГЛ). Из условия минимизации функционала ГЛ свободной энергии выведена система уравнений, описывающая сверхпроводящее состояние неоднородной пластины. С использованием полученных уравнений рассчитаны критические параметры неоднородной сверхпроводящей пленки, а также распределение параметра порядка внутри нее. Расчеты проведены при различных толщинах переходного слоя на границах пленки. Сделан вывод о влиянии толщины переходного слоя на критические параметры сверхпроводящей пленки и распределение параметра порядка внутри нее.

P. I. BEZOTOSNYI, K. A. DMITRIEVA, S. YU. GAVRILKIN,
A. N. LYKOV, A. YU. TSVETKOV

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

GENERALIZED GINZBURG-LANDAU EQUATIONS FOR DESCRIBING THE SUPERCONDUCTING STATE OF INHOMOGENEOUS FILMS AND THEIR NUMERICAL SOLUTIONS

An approach to modeling the superconducting properties of inhomogeneous superconducting films in the framework of the Ginzburg-Landau (GL) theory is proposed. From the condition of minimizing the GL functional of free energy, a system of equations is derived that describes the superconducting state of an inhomogeneous plate. The obtained equations are used to calculate the critical parameters of an inhomogeneous superconducting film, as well as the distribution of the order parameter inside it. The calculations were carried out at different thicknesses of the transition layer at the film boundaries. It is concluded that the thickness of the transition layer influences the critical parameters of the superconducting film and the distribution of the order parameter inside it.

Тонкие пленки характеризуются неоднородностью их свойств, в том числе сверхпроводящих, по толщине. Для достаточно тонкой пленки параметры ее решетки, а также другие свойства могут ощутимо отличаться от свойств материала, из которого она сделана. В этой связи, модели, описывающие реальные сверхпроводящие пленки, должны учитывать неоднородность свойств по ее толщине.

В работе предложен метод расчета критического состояния неоднородных сверхпроводящих пленок в рамках теории Гинзбурга-Ландау. Из условия минимизации функционала ГЛ свободной энергии выведена система уравнений, описывающая сверхпроводящее состояние неоднородной пластины. С помощью предложенного метода рассчитаны и сопоставлены между собой зависимости критического тока от магнитного поля для случаев неоднородного и однородного распределений сверхпроводящих свойств по толщине пленки. Было показано, что критический ток в нулевом магнитном поле уменьшается, а критическое магнитное поле значительно увеличивается с увеличением степени неоднородности пленки. Анализ зависимостей объемной силы пиннинга от внешнего магнитного поля показывает смещение максимума этой величины в сторону более сильных полей с увеличением степени неоднородности. Обнаружено, что чем резче изменение свойств на границах пластины (чем меньше толщина переходного слоя около ее границ) и, как следствие, чем больше толщина однородного слоя в центре, тем больше становится критический ток. В то же время критическое магнитное поле в этом случае изменяется незначительно. Критическое магнитное поле, как для однородных, так и для неоднородных пленок увеличивается с уменьшением их толщины.

Дополнительно проанализировано распределение параметра порядка внутри как однородной, так и неоднородной пленки. Показано, что сверхпроводящий параметр порядка неоднородных пластин больше, чем параметр однородных пластин, поэтому сверхпроводимость в неоднородных пластинах более устойчива в магнитном поле, что приводит к увеличению критического поля. Более подробно см. в работе[1].

Список литературы

1. P.I. Bezotosnyi, K.A. Dmitrieva et al. // IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 2021, Vol. 31, № 3, 7500107.

К.А. БОРОДАКО¹, А.В. ШЕЛЯКОВ¹, Н.Н. СИТНИКОВ^{1,2},
О.Н.СЕВРЮКОВ¹, И.А. ЗАЛЕТОВА^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
²АО «Государственный научный центр Российской Федерации
«Исследовательский центр имени М.В.Келдыша», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ И ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВАХ TiNiCu

Аморфные сплавы системы TiNi-TiCu с содержанием меди от 25 до 40 ат.% были получены методом планарного литья при скорости охлаждения расплава около 10⁶ К/с. Кристаллизация сплавов проводилась изотермическим отжигом и воздействием электрического импульса с варьируемой длительностью. Установлено, что увеличение содержания меди более 30 ат.% приводит к резкому снижению пластичности сплавов и величины эффекта памяти формы. В то же время радикальное сокращение времени кристаллизации приводит к значительному улучшению характеристик памяти формы, что связано с предотвращением образования в структуре сплавов хрупких фаз Ti-Cu.

К.А. BORODAKO¹, A.V. SHELYAKOV¹, N.N. SITNIKOV^{1,2},
O.N. SEVRYUKOV¹, I.A. ZALETOVA^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia
²JSC «Keldysh State Research Center», Moscow, Russia

INFLUENCE OF COPPER CONTENT AND EXTERNAL ACTIONS ON SHAPE MEMORY EFFECT IN RAPIDLY QUENCHED TiNiCu ALLOYS

Amorphous alloys of the TiNi - TiCu system with a copper content of 25 to 40 at.% were prepared by planar flow casting at a melt cooling rate of about 10⁶ K/s. The alloys were crystallized by isothermal annealing and by action of electric pulse with variable duration. Increasing the copper content to above 30 at.% considerably reduces the plasticity and shape memory effect of the alloys. However, significant reduction of annealing duration significantly improves the shape memory performance due to prevention of the formation of brittle Ti-Cu phases in the alloys structure.

Быстрозакаленные сплавы квазибинарной интерметаллической системы TiNi-TiCu с высоким содержанием меди (более 25 ат.%) представляют большой интерес в качестве материалов с памятью формы благодаря возможности значительного уменьшения величины температурного и деформационного гистерезиса по сравнению с бинарным сплавом TiNi [1]. Для получения сплавов использовалась методика планарного литья [2], с помощью которой при скорости охлаждения расплава около 10⁶ К/с были изготовлены аморфные

сплавы TiNiCu с содержанием меди 25, 30, 35 и 40 ат.% (в дальнейшем обозначенные 25Cu, 30Cu, 35Cu и 40Cu, соответственно) в виде лент толщиной 30–50 мкм.

Термообработка сплавов осуществлялась двумя способами: отжигом на воздухе при 500°C в течение 100–300 с и пропусканием через образец одиночного импульса электрического тока длительностью от 1 до 100 мс.

Исследование эффекта памяти формы (ЭПФ) в сплавах проводилось с помощью метода испытаний на изгиб [3]. Для определения параметров ЭПФ получали зависимости возвращаемой за счет ЭПФ деформации ξ_{sme} от начальной деформации ξ_i . Результаты исследований показали, что с уменьшением длительности изотермической термообработки с 300 с до 100 с величина ξ_{sme} возрастает при одинаковой ξ_i . При этом увеличение содержания меди заметно снижает максимальную величину ξ_{sme} , а сплав 40Cu является настолько хрупким, что ЭПФ в нем не наблюдается. Высокоскоростная электроимпульсная кристаллизация приводит к существенному увеличению максимального значения ξ_{sme} для сплавов 25Cu и 30Cu (с 5,1% до 6,4% и с 4,5% до 7%, соответственно) и кардинально изменяет свойства сплавов с большим содержанием меди: в сплаве 35Cu наблюдается резкое увеличение пластичности и величины ξ_{sme} , а в сплаве 40Cu появляется значительный ЭПФ.

Для выявления причин наблюдаемых явлений был выполнен рентгеноструктурный фазовый анализ сплавов на дифрактометре PANalytical Empyrean. Установлено, что в сплавах 35Cu и 40Cu после изотермической термообработки формируется преимущественно хрупкая фаза B11 (TiCu), препятствующая проявлению ЭПФ. В то же время после электроимпульсной кристаллизации эти сплавы находятся в мартенситном состоянии со структурой B19, а при нагреве до температуры 75°C переходят в аустенитное состояние в результате мартенситного превращения B19 \leftrightarrow B2, сопровождающегося заметным ЭПФ.

Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект №19-12-00327).

Список литературы

1. S W Kang et al. 2010, Scr. Mater., 62, 71–74.
2. A V Shelyakov et al. 2020, J. Phys.: Conf. Ser., 1686, 012056.
3. A V Shelyakov et al. 2020, Russ. Metall. 2020, 345–350.

С.В. ВЕСЕЛОВА, Д.А. АБИН, И.В. АНИЩЕНКО,
С.В. ПОКРОВСКИЙ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ, И.А.
РУДНЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОНЕСУЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННЫМИ И ИМПУЛЬСНЫМИ ТОКОВЫМИ НАГРУЗКАМИ

Проведено исследование влияния постоянной и импульсной токовых нагрузок на значение критического тока ВТСП лент второго поколения при различных режимах его протекания, применяемых в современных установках. Показано, что при длительном протекании тока высокой плотности ($I_1=0,9I_c$, $I_2=1,1I_c$) через сверхпроводящий мостик, сформированный на высокотемпературной сверхпроводящей ленте, деградация токонесущих характеристик мостика не наблюдается. При импульсном воздействии возникают необратимые изменения, приводящие к порче образца.

S.V. VESELOVA, D.A. ABIN, I.V. ANISCHENKO,
S.V. POKROVSKY, A.S. STARIKOVSKY, M.A. OSIPOV,
I.A. RUDNEV

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

STUDY OF THE CURRENT CHARACTERISTICS OF SECOND GENERATION HTSC TAPES UNDER LONG-TERM AND PULSE CURRENT LOADS

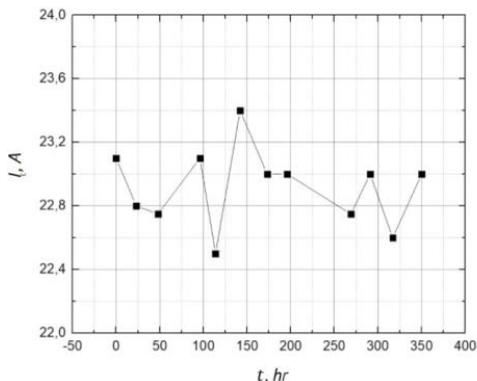
The effect of high current density on HTSC tapes at various modes of its flow, used in modern installations, was considered. It was shown that with long-term flow of a high-density current ($I_1=0,9I_c$, $I_2=1,1I_c$) through a superconducting bridge formed on a high-temperature superconducting (HTSC) tape, there is no degradation of the current-carrying characteristics of the bridge. Under impulse action, irreversible changes occur, leading to damage to the sample.

В данной работе исследовано явление электромиграции в промышленных образцах ВТСП лент 2-го поколения. В качестве образцов использовались REBaCuO (где RE – это редкоземельный элемент) ленты с медным покрытием. Предварительно на поверхности ленты был сформирован сверхпроводящий мостик (с целью увеличить величину плотности критического тока) методом химического травления. Через образец пропусклся постоянный ток величиной $I_1=0,9I_c$, $I_2=1,1I_c$. Длительность воздействия составляла до 350 часов. Величина плотности тока на мостике составляла $J = 1,38 \cdot 10^{10}$ А/м², $3,03 \cdot 10^{10}$ А/м².

Измерения проводились при температуре кипения жидкого азота (77 К). Через некоторые промежутки времени проводилось измерение вольтамперных характеристик образцов, в результате чего получены зависимости критического тока от времени для ВТСП лент 2ого поколения (см. рисунок 1).

Рис. 1. График зависимости критического тока от времени

Было показано, что при долговременном воздействии высокой плотности



тока величина критического тока остаётся в допустимых пределах. Таким образом, используемой плотности тока недостаточно для возникновения диффузии кислорода в сверхпроводящем слое композита. При импульсном воздействии ток электромиграции превысил пороговые значения, следствием чего стало необратимое повреждение СП слоя. Было найдено пограничное значение длительности импульса.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-29-10024.

Список литературы

1. Fischer B. Gromoll; G. Ries; W. and others// IEEE. 1997. Vol. 7. P. 828–831.
2. Moeckly B. H., Lathrop D. K., Buhrman R. A.// APS. 1997. Vol. 47. P. 400.
3. K. Govinda Rajan, P. Parameswaran, J. Janaki// J. Phys.:1990. Vol. 23, №. 6. P. 694–697.

Е.А. ВИЛКОВ¹, С.Г. ЧИГАРЕВ¹, И.В. МАЛИКОВ², Л.А.ФОМИН²

¹ Филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязино, Россия

² Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
Черноголовка, Россия

СПЕКТРЫ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В МАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДАХ Fe/Mo И Fe/Co₂FeAl

Исследованы спектры ТГц излучения в магнитных переходах Fe/Mo и Fe/Co₂FeAl, возникающие при накачке током высокой плотности верхней спиновой подзоны в пограничном слое. Тензорный характер константы обменного взаимодействия на Fe/Mo интерфейсе, связанный с наличием взаимодействия Дзялошинского-Мория, способствует излучательной релаксации.

E.A. VILKOV¹, S.G. CHIGAREV¹, I.V. MALIKOV¹, L.A. FOMIN²

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino, Russia

²Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Chernogolovka, Russia

THz RADIATION SPECTRA IN MAGNETIC Fe/Mo AND Fe/Co₂FeAl TRANSITIONS

An investigation was made of THz radiation spectra in the Fe/Mo and Fe/Co₂FeAl magnetic transitions arising from the pumping by a high-density current of the upper spin subband at the Fe/Mo interface. The tensor character of the exchange interaction constant at the Fe/Mo interface, associated with the presence of the Dzyaloshinsky-Moriya interaction, promotes radiative relaxation.

Мы рассматриваем инжекцию электронов в пограничную область Fe/Mo и Fe/Co₂FeAl. Две структуры имеют отличия для механизма формирования ТГц излучения [1]. Для структуры с Мо существует сильное спин-орбитальное взаимодействие, в результате которого на границе с железом для электронов проводимости возникает взаимодействие типа Дзялошинского-Мория, а также может реализовываться неколлинеарное распределение намагниченности. В этом случае спин-поляризованный ток высокой плотности, текущий от Fe к Мо, будет накачивать электроны в верхнюю спиновую подзону в пограничном слое. Электроны должны релаксировать, а тензорный характер константы обменного взаимодействия способствует излучательной релаксации. В случае структуры со сплавом Гейслера механизм формирования ТГц излучения в основном определяется однородным обменным взаимодействием, но за счет спиновой поляризации близкой к единице эффективность возникновения динамического

спин-инжекционного излучения также ожидается высокой. Цель данной работы сравнить эти два механизма.

Спектральные характеристики излучателя, измеренные с помощью дифракционной решетки, показаны на рис. 1. Пересчет через угол дифракции показывает, что спектр излучения лежит в диапазоне частот 5 - 12 ТГц. Частота максимального сигнала составляет $f = 7.0$ ТГц. Полная ширина спектральной кривой на полувысоте составила 2.28 ТГц. Приведенная кривая не описывается формулой Планка, что указывает на не тепловой характер регистрируемого излучения. Из сравнения спектров для двух структур делаем вывод, что особенности формирования механизма излучения слабо влияют на итоговый спектр излучения. Отличие в том, что для структуры Fe/Mo максимальное значение интенсивности излучения приходит на первый пик.

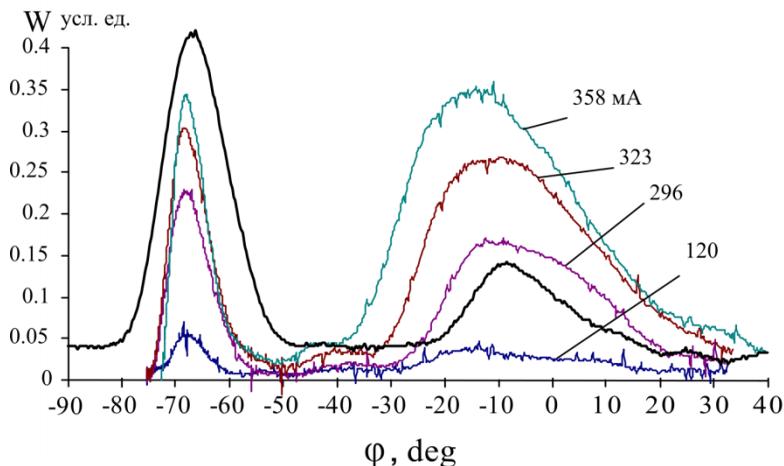


Рис. 1. Спектры спин-инжекционного излучателя для разных токов, измеренные с помощью дифракционной решетки. Черная кривая- пленки Mo (ток накачки 480 mA), цветные кривые - пленка сплава Гейслера.

Список литературы

1. Kadigrobov A., Ivanov Z., Claeson T., Shekhter R. I. and Jonson M. // Europhys. Lett. 2004 Vol. 67, P. 948

Д.М. ВОРОПАЕВ¹, А.В. ФРОЛОВ², А.П. ОРЛОВ²,
А.А.СИНЧЕНКО^{2,3}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

²Институт радиоэлектроники и электроники РАН им. В.А. Котельникова

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ТОКОВО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПИННИНГА ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ В КВАЗИДВУМЕРНОМ СОЕДИНЕНИИ TbTe₃

В мостиковых структурах TbTe₃, ориентированных вдоль направления скольжения волны зарядовой плотности (ВЗП), исследована эволюция порогового поля инициации движения ВЗП при выдержке образца при температуре ниже перехода Пайерлса, в зависимости от подаваемого тока через образец. Обнаружено, что при поддержании ВЗП в состоянии движения пороговое поле практически не меняется, и наоборот, при нахождении ВЗП в статическом состоянии, величина порогового поля начинает зависеть от времени.

D.M. VOROPAEV¹, A.V. FROLOV², A.P. ORLOV²,
A.A.SINCHENKO^{2,3}

¹Moscow institute of physics and technology (National Research University)

²Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS (IRE RAS)

³Lomonosov Moscow State University

CURRENT-TIME EVOLUTION OF PINNING OF A CHARGE- DENSITY WAVE IN A QUASI-TWO-DIMENSIONAL COMPOUND TbTe₃

The bridge structures of terbium tritelluride, oriented in the direction of the charge density wave (CDW) sliding were studied. The evolution of threshold field was studied below the temperature of Payerls in dependence of current through the sample. It turned out, that keeping CDW in sliding regime by high current, the threshold field doesn't change, by contrast, keeping CDW in static by low current, the threshold field starts to depend on time.

В ряде квазидвумерных соединений существует волна зарядовой плотности(ВЗП), а в соединениях трителлуридах редкоземельных элементов RTe₃ (R: La, Ce, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Er, Tm) наблюдается её скольжение [1,2]. Ранее на образцах TbTe₃ 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]. Целью данного исследования является изучение эволюции порогового поля при определенной

температуре ниже перехода Пайерлса, в зависимости от приложенного постоянного тока.

Монокристаллы $TbTe_3$ утонялись методом микромеханической эксфолиации; выбирались участки кристалла с наибольшей плоской поверхностью; при помощи лазера формировались мостиковые структуры, на которые наносились четыре контакта из индия методом холодной пайки. На приготовленных структурах измерялись электронные транспортные свойства.

Эксперименты проводились в диапазоне температур от 180К до 310К и при значениях тока от -5 мА до +5 мА. Процесс эксперимента проходил следующим образом: сначала происходил процесс отжига образцов при температуре выше температуры Пайерлса ($T > T_c \sim 325K$) в течение 30 минут в атмосфере инертного газа, затем происходил процесс охлаждения до температуры, при которой происходила выдержка образца (280К), после этого проводились измерения ВАХ и сопротивления через фиксированные промежутки времени. Между измерениями через образец проходил постоянный ток, и, в зависимости от его значений, напряжение на образце было либо выше порогового (в состоянии скольжения ВЗП), либо ниже (в статическом состоянии). В процессе экспозиции осуществлялся непрерывный контроль сопротивления образца.

В результате экспериментов было получено, что при большом токе, который соответствует режиму скольжения, пороговое поле слабо увеличивается со временем. Поскольку процесс переноса тока волной зарядовой плотности является неравновесным процессом, то нахождение в режиме скольжения препятствует переходу к основному состоянию, и не приводит к образованию центров дополнительного пиннинга.

Список литературы:

1. *Monceau P.* //Advances in Physics. – 2012. – Vol. 61, №. 4, P. 325-581.
2. *Sinchenko A.A., Lejay P., Monceau P.* //Phys. Rev. B. 2012. Vol. 85, №. 24, P. 241104.
3. *Frolov A.V. et al.* //Physical Review B. – 2020. – Т. 101. – №. 15. – С. 155144.
4. *Frolov A.V. et al.* //JETP Letters. – 2019. – Vol. 109. – №. 3. – P. 203-206.

А.А.ВОРОШНИНА^{1,2}, И.С.МЕРЕНКОВ^{2,3}

*¹Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Новосибирск, Россия*

²ИИХ СО РАН, Новосибирск, Россия

³Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ НАНОСТЕНОК h-BN ЧЕРЕЗ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ДОПИРОВАНИЕ АТОМАМИ КИСЛОРОДА

Изучено влияние изменения различных параметров низкотемпературной плазменной обработки поверхности наностенок h-BN в кислородсодержащей атмосфере на состав и структуру образцов. Получены зависимости некоторых функциональных характеристик от концентрации атомов кислорода.

A.A.VOROSHINA^{1,2}, I.S.MERENKOV^{2,3}

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

²Nikolaev institute of inorganic chemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

CONTROL OF THE PROPERTIES OF h-BN NANOWALLS THROUGH PLASMA-CHEMICAL DOPING WITH OXYGEN ATOMS

The effect of changes in various parameters of low-temperature plasma treatment to the surface of h-BN nanowalls in an oxygen-containing atmosphere on the composition and structure of the samples have been studied. The dependences of some functional characteristics on the concentration of oxygen atoms are obtained.

Одной из наиболее перспективных и интересных задач современного материаловедения является разработка подходов к получению наноматериалов с изменяемыми в широких интервалах свойствами. Среди основных способов управления свойствами наноструктур можно выделить модификацию морфологии или состава, а наибольший интерес представляет направление комплексной модификации.

Примером модификации морфологии является изменение ориентации слоев графена или его изоструктурного аналога – гексагонального нитрида бора (h-BN) на перпендикулярной подложке (образование наностенок). Такая трансформация приводит к появлению большой площади поверхности и активных острых краев, благодаря чему покрытия на основе углеродных и борнитридных наностенок демонстрируют перспективные антибактериальные и эмиссионные свойства.

Модификация состава является еще одним способом управления электрохимическими, оптическими, эмиссионными и другими свойствами. Оксид графена, получаемый окислением графена или графита, уже нашел свое применение в качестве твердого электролита в литий-ионных батареях, свинцово-кислотных аккумуляторах, а также в качестве материала для оптических биосенсоров. Широко исследуется газофазное окисление углеродных наностенок в плазме различного вида, которое приводит к увеличению поверхностной энергии и улучшению свойств проводимости. С другой стороны, окисление структур на основе h-BN изучаются не так активно, несмотря на то, что существующие расчетные и единичные экспериментальные работы указывают на возможность управления электрохимическими и эмиссионными свойствами. Прежде всего, это связано со сложностью окисления гексагонального нитрида бора, являющегося более химически и термически устойчивым по сравнению с графеном. Одно из возможных решений данной проблемы – использование плазменной активации ионов для снижения температуры реакции. Такой подход относительно прост в реализации и позволяет регулировать параметры эксперимента в широких пределах, открывая тем самым перспективы для использования в коммерческих масштабах.

Таким образом, целью работы является разработка низкотемпературной методики плазмохимического окисления наностенок h-BN и описание изменения состава структуры и функциональных свойств получаемых комплексно модифицированных структур.

В качестве исходных образцов использовались наностенки h-BN, полученные методом PECVD. Синтез проводился из смеси $(C_2H_5)_3N \cdot BH_3$ и NH_3 при температуре $400^\circ C$, мощности плазмы 25 Вт, в течении 120 мин. Низкотемпературное окисление образцов проводилось в атмосфере синтетического воздуха (79 об.% N_2 + 21 об.% O_2). Были выполнены серии экспериментов с изменением одного из параметров: давления синтетического воздуха, температуры обработки, времени экспозиции и мощности плазмы, определено влияние этих параметров на состав и структуру образцов. Кроме того, изучено влияние данных параметров на интенсивность катодолуминесценции, изменение ширины запрещенной зоны и поверхностной энергии.

С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹, А.Э. РАБАДАНОВА¹,
Н.М.-Р. АЛИХАНОВ^{1,2}, Д.К. ПАЛЧАЕВ¹, М.Х. ГАДЖИЕВ³,
Р.М. ЭМИРОВ¹, Ж.Х. МУРЛИЕВА¹, М.В. ИЛЬИЧЕВ³,
П.М. САЙПУЛАЕВ¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

³Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ ВИСМУТА ЛАНТАНОМ НА СТРУКТУРУ КЕРАМИКИ BiFeO₃

Изучено влияние легирования La на структуру наноструктурированных керамик BiFeO₃ (BFO). Установлено, что при легировании La уменьшается количество примесных фаз до нуля. Двойные пики (104), (110) и (116) для керамики BFO, обладающей искаженной ромбоэдрической структурой перовскита (R3c), с увеличением концентрации La постепенно объединяются в одинарные широкие пики.

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV¹, A.E. RABADANOVA¹,
N.M.-R. ALIKHANOV^{1,2}, D.K. PALCHAEV¹,
M.KH. GADZHIEV³, R.M. EMIROV¹, ZH.KH. MURLIEVA¹, M.V.
ILYICHEV³, P.M. SAIPULAEV¹

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

INFLUENCE OF SUBSTITUTION OF BISMUTH WITH LANTHANUM ON THE STRUCTURE OF CERAMICS BiFeO₃

The effect of doping with La on the structure of nanostructured ceramics BiFeO₃ (BFO) has been studied. It was found that doping with La reduces the amount of impurity phases to zero. Double peaks (104), (110), and (116) for BFO ceramics with a distorted rhombohedral perovskite structure (R3c) gradually combine into single broad peaks with an increase in La concentration.

В работе приведены результаты исследования структуры керамик на основе BiFeO₃ при замещении Bi на La. Наноструктурированные керамические образцы состава Bi_{1-x}La_xFeO₃ (где x = 0; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2) были изготовлены, согласно рекомендациям, в [1], из нанопорошков, синтезированных золь-гель методом. На рисунке 1 представлены результаты исследования структуры керамик составов Bi_{1-x}La_xFeO₃ (при x = 0; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2). Фазовый анализ показал, что образец BFO содержит менее 5% примесных фаз (в основном Bi₂Fe₄O₉ и Bi₂₅FeO₃₉ при

значениях 2θ из интервала от $\sim 27^\circ$ до $\sim 29^\circ$), количество которых уже при 5% легирования La уменьшается до нуля. Средний размер кристаллитов, вычисленный по формуле Дебая-Шерера, составляет 53 нм, 60.5 нм, 44 нм, 31.7 нм и 29.7 нм для образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ при $x=0; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$ соответственно. С ростом содержания La (рисунок 2) параметр a и объем элементарной решетки уменьшаются, параметр c проходит через максимум при $x=0.1$. Такое поведение обеспечил процесс наноструктурирования образцов.

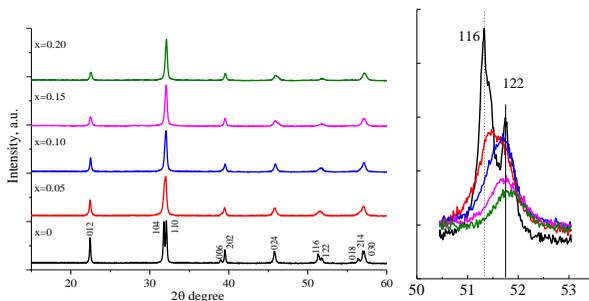


Рис. 1. Результаты дифракционного анализа образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$.

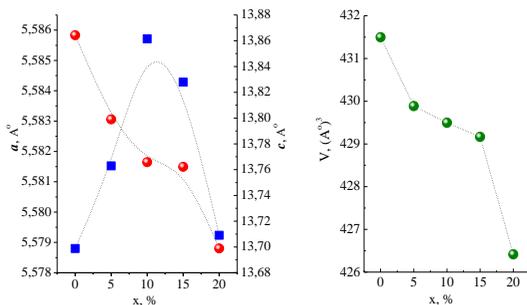


Рис. 2. Параметры элементарной решетки для составов $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0.05, 0.1, 0.15$ и 0.2).

Работа была поддержана грантом РФФИ № 20-08-00242А, частично ГЗ FZNZ-2020-0002 и проектом «УМНИК» 14057ГУ/2019.

Список литературы

1. Садьков С.А., Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х. и др. // Физика твердого тела. – 2017. – 59 (9). – pp. 1747-1753.

Л.Д. ГВАРИШВИЛИ, И.В. ЩЕТИНИН, Т.Р. НИЗАМОВ,
П.С. МОГИЛЬНИКОВ, И.Г. БОРДЮЖИН

*Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва,
Россия*

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕКСАФЕРРИТА СТРОНЦИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Методом соосаждения и гидротермальным методом получены наночастицы гексаферрита стронция. Проведены комплексные исследования формирования структуры и магнитных свойств гексаферрита стронция, в том числе исследования биосовместимости.

L.D. GVARISHVILI, I.V. SHCHETININ, T.R. NIZAMOV,
P.S. MOGILNIKOV, I.G. BORDYUZHIN

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF STRONTIUM HEXAFERRITE OBTAINED BY CHEMICAL METHODS

Strontium hexaferrite nanoparticles were obtained by coprecipitation and hydrothermal methods. Complex studies of the formation of the structure and magnetic properties of strontium hexaferrite have been carried out, including studies of biocompatibility.

Одним из наиболее интересных приложений гексагональных ферритов стронция на сегодняшний день является их использование в качестве терапевтических агентов, что возможно благодаря высокой магнитокристаллическая анизотропии, высокой температуре Кюри, а также химической стабильности в биологических средах [1]. Помимо этого, наночастицы гексаферрита Sr являются не цитотоксичными, что предполагает их потенциальное использование в медицине, в качестве контрастных агентов для МРТ-диагностики, для адресной доставки лекарств и гипертермии. Структура гексаферрита допускает многочисленные замены магнитными ионами, (La^{3+} , Gd^{3+} , Fe^{3+} , Co^{2+}) и немагнитными ионами (Al^{3+} , Zn^{3+} , Ga^{3+}). На магнитные свойства ферритов также оказывает влияние структура и размер зерен, что говорит о необходимости нахождения эффективного метода синтеза и подбора параметров его проведения. Сложность синтеза ультратонких наночастиц ферритов связана с тем, что температура синтеза обычно выше 600 С. Таким образом, неоднородность состава и высокие температуры приводят к образованию сильно агломерированных частиц субмикронного размера.

Целью настоящей работы является изучение фазово-структурного состояния, магнитных свойств и возможных химических методов образования ультратонких

наночастиц гексагональных ферритов Srв том числе и легированных магнитными и немагнитными ионами.

В данной работе методом соосаждения и гидротермальным методом был синтезирован $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Выбор технологии синтеза обусловлен такими преимуществами, как гомогенность получаемого материала и возможность контроля свойств в процессе синтеза. Исследования синтезированных образцов проводились методами рентгеноструктурного анализа, измерения магнитных свойств методом вибромагнитометрии, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). По данным фазового анализа метод соосаждения с последующим отжигом позволяет получать однофазное состояние фазы $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, причем размер частиц по данным ПЭМ составлял 50-100 нм. Образцы, полученные методом гидротермального синтеза, представляли собой агломераты из тонких пластин гексагональной формы (рис. 1). Прокаленный образец показал высокую удельную намагниченность насыщения ($M_s=68 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$), а гидротермально синтезированные наночастицы – $M_s=63,58 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$, что близко к теоретическому значению ($M_s=74,3 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$).

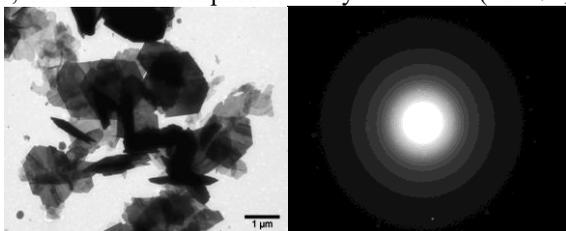


Рис. 1. ПЭМ-изображения наночастиц $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, синтезированных гидротермальным методом

Результаты цитотоксических исследований показали хорошую биосовместимость синтезированных материалов.

Список литературы

1. Lisjak D., Mertelj A. Anisotropic magnetic nanoparticles: A review of their properties, syntheses and potential applications // Progress in Materials Science. – 2018. – V. 95. – P. 286–328.

А.В. ГОРЯЧЕВСКИЙ¹, Л.П. СУХАНОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САМООРГАНИЗОВАННЫХ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК ПОЛЯРНЫХ МОЛЕКУЛ C₆₀F₁₈

Были изучены электрические свойства молекул фторида фуллерена, обладающих высоким электрическим дипольным моментом, при их адсорбции на различных поверхностях. Исследовались возможности создания интерфейсов с заданными физико-химическими характеристиками и управления их свойствами. Получены пространственные карты электростатического потенциала отдельной молекулы. Промоделировано распределение электростатического потенциала различных ансамблей молекул фторфуллерена, наблюдавшихся ранее в экспериментах, и их воздействие на подложку. Сделаны выводы о характере взаимодействия молекул адсорбата с подложкой, влиянии коллективных электростатических эффектов на структуру монослоя и сдвиг основных электронных уровней.

A.V. GORYACHEVSKIY¹, L.P. SUKHANOV^{1,2}

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

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

SIMULATION OF THE ELECTRIC PROPERTIES OF SELF- ASSEMBLING ISLAND-TYPE FILMS OF C₆₀F₁₈ POLAR MOLECULES

The electrical properties of fullerene fluoride molecules with a high electric dipole moment during their adsorption on different surfaces were studied. The possibilities of creating interfaces with specified physical and chemical characteristics and controlling their properties were investigated. Spatial maps of the electrostatic potential of a single molecule are obtained. The distribution of electrical properties of various ensembles of fluorofullerene molecules observed earlier in experiments and their effect on the substrate are modeled. Conclusions are drawn about the nature of the interaction of adsorbate molecules with the substrate, the effect of collective electrostatic effects on the monolayer structure and the shift of the core electronic levels.

Молекулы фторида фуллерена C₆₀F₁₈, обладающие высоким электрическим дипольным моментом, при адсорбции на различных поверхностях образуют островковую пленку с гексагональной плотноупакованной структурой внутри нее [1,2]. Это открывает возможность создания переходных слоев на границе различных материалов с целью управления переносом заряда между ними и создания таким образом новых электронных устройств и элементной базы молекулярной электроники.

В данной работе были использованы данные по квантово-химическому расчету электрического поля реальной молекулы $C_{60}F_{18}$ [3]. По рассчитанному распределению электростатического потенциала (ЭП) отдельной молекулы было промоделировано распределение ЭП кластеров молекул фторфуллерена, наблюдавшихся ранее в экспериментах [1,2]. Были получены двумерные срезы трехмерной пространственной карты ЭП для однослойных и многослойных кластеров молекул фторфуллерена. Моделирование островов показало, что ЭП данных структур является немонотонным и сильно осциллирует вблизи молекул структуры. Также промоделирован ЭП от разреженных структур, моделирующих разрозненные отдельные молекулы, адсорбированные на подложке. ЭП разреженного кластера осциллирует, начиная с более далеких расстояний, чем в случае плотноупакованного кластера.

Результаты данного моделирования показывают наличие ЭП вблизи разнообразных типов адсорбированных структур и его неоднородность и немонотонность, что говорит о возможности значительного воздействия на подложку со стороны пленки. Разные по структуре кластеры демонстрируют различный характер поведения ЭП вблизи поверхности подложки, что может быть использовано для управляемого изменения электронных свойств поверхности и создания на ней различных электронных устройств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90246.

Список литературы

1. Bairagi K., Bellec A., Chumakov R.G. and others// Surf. Sci. 2015. Vol. 641. P. 248–251.
2. Горячевский А.В., Суханов Л.П., Лебедев А.М. и др.// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. №. 10. P. 52–59.
3. Суханов Л.П., Чумаков Р.Г., Горячевский А.В. и др.// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 8. P. 30–37.

В.А. ГРИГОРЬЕВ^{1,2}, П.В. КОНАРЕВ^{1,3}, А.В. БУЗМАКОВ¹,
Д.А. ЗОЛОТОВ¹

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ПОЛУПЕТЛЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ В МОНОКРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ ТОПО- ТОМОГРАФИИ

Проведено моделирование полигональных полупетлевых дислокаций в монокристалле кремния по данным рентгеновской дифракционной топо-томографии путем численного решения уравнений Такаги-Топэна. Рассчитанные двумерные изображения дислокаций сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на станции ID19 синхротронного центра ESRF, и показано их хорошее соответствие друг другу.

V. A. GRIGOREV^{1,2}, P. V. KONAREV^{1,3}, A. V. BUZMAKOV¹,
D. A. ZOLOTOV¹

¹FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

³NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

MODELLING OF POLYGONAL HALF-LOOPS DISLOCATIONS IN SILICON SINGLE CRYSTAL USING X-RAY DIFFRACTION TOPO-TOMOGRAPHY DATA

Modeling of polygonal half-loop dislocations in silicon monocrystal was performed using X-ray diffraction topo-tomography data by solving numerically Takagi-Taupin equations. The calculated 2D dislocation images are compared with experimental data obtained at the ID19 station of the ESRF synchrotron center, and their good correspondence to each other is demonstrated.

Рентгеновская дифракционная топо-томография (РДТТ) представляет собой неразрушающий метод диагностики внутреннего совершенства кристаллических материалов[1,2]. Основой этого метода является высокая чувствительность рентгеновской дифракции в кристаллах к относительно малым смещениям узлов кристаллической решетки. Таким образом, РДТТ позволяет визуализировать дефекты кристаллической структуры, которые приводят к изменению положений отдельных атомов кристаллической структуры относительно их правильного положения.

Нами было проведено моделирование полигональных полупетлевых дислокаций монокристалла кремния путем численного решения уравнений Такаги-Топэна [3-5], выполненное на основе алгоритма, предложенного ранее в работе [6]. За счет модернизации исходного программного кода, удалось сократить время расчетов с 20 до 3 часов на 8-ядерном процессоре Intel Core i7-7820X при прочих равных условиях. Кроме того, для удобства вычислений, все входные параметры были вынесены в отдельный конфигурационный файл, позволяющий удобно задавать разные типы дислокаций, энергию падающих фотонов и вектор дифракции.

Для расчетов использовались условия эксперимента, выполненного ранее на станции ID19 синхротронного центра ESRF (Гренобль, Франция) [7]. В результате были рассчитаны двумерные изображения для двух типов полигональных полупетлевых дислокаций (длиной 600 мкм и 250 мкм), соответствующих направлениям дислокаций $[-1,-1,0]$, $[0,-1,1]$, $[1,0,1]$ и вектору Бюргерса $[0,-1,1]$. Сравнение рассчитанных изображений с экспериментальными данными показало их хорошее соответствие друг другу.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, а также при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-02-00556).

Список литературы

1. Authier A., Dynamical Theory of X-ray Diffraction (Oxford Univ. Press, New York, 2001), P. 513.
2. Epelboin, Y. // Acta Crystallogr. A 1975, Vol. 31, P. 591-600.
3. Takagi, S. // Acta Cryst. 1962, Vol. 15, P. 1311-1312.
4. Takagi, S. // J. Phys. Soc. Japan 1969, Vol. 26., P. 1239-1253.
5. Taupin, D. // Bull. Soc. Fr. Mineral. 1961, Vol. 84, P. 51.
6. Besedin, I.S., Chukhovskii, F.N. and Asadchikov, V.E. // Cryst. Rep. 2014, Vol. 59, P. 323-330.
7. Asadchikov, V.E., Buzmakov, A.V., Chukhovskii, F.N. and others // J. Appl. Cryst. 2018, Vol. 51, P. 1616-1622.

М.Д. ГРИЦКЕВИЧ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, В.Н. НЕВОЛИН,
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ Mo-S-C-H, ФОРМИРУЕМЫХ РЕАКЦИОННЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

Рассмотрены структурные и морфологические изменения в покрытиях, полученных методом реакционного импульсного лазерного соосаждения молибдена и углерода в реакционной газовой среде (сероводороде, H₂S) различного давления. Выявлены различия в трибологических свойствах в зависимости от режима осаждения. Приведены результаты исследования структуры, морфологии и трибологических свойств этих покрытий при различных значениях давления.

M.D. GRITSKEVICH, D.V. FOMINSKI, V.N. NEVOLIN,
V.Y. FOMINSKI

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

CHEMICAL STATE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SOLID-LUBRICATING Mo-S-C-H COATINGS FORMED BY REACTIVE PULSE LASER DEPOSITION

Structural and morphological changes in coatings obtained by the method of reactive pulsed laser codeposition of molybdenum and carbon in a reaction gas medium (hydrogen sulfide, H₂S) of various pressures are considered. Differences in tribological properties are revealed depending on the deposition regime. The results of studying the structure, morphology and tribological properties of these coatings at various pressures are presented.

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), например, Mo/W/S₂/Se₂, хорошо зарекомендовали себя как твердосмазочные покрытия с высокими антифрикционными свойствами. Однако, чередование слоёв ДПМ с DLC (diamondlike carbon), иначе говоря, алмазоподобным углеродом, позволило значительно повысить износостойкость получаемых покрытий и уменьшить коэффициент трения, так как углеродная нанофаза способствует упрочнению материала [1]. Поэтому данный способ модифицирования является одним из наиболее перспективных на данный момент.

Метод реакционного импульсного лазерного осаждения (РИЛО) позволяет создавать оригинальные покрытия, состоящие из комбинации ДПМ и DLC(H). При помощи данной методики можно сформировать более гладкие и однородные слои сульфида молибдена MoS_x и DLC(H) (рис. 1, а-в), и варьировать

отношение элементов $x=Mo/S$ в широких пределах ($1 \leq x \leq 4$). Изменением режимов осаждения, например, давления, можно добиться значительного повышения трибологических свойств в условиях различной влажности и изменении температур испытаний от $22^\circ C$ до $-100^\circ C$ (рис.2, а-в).

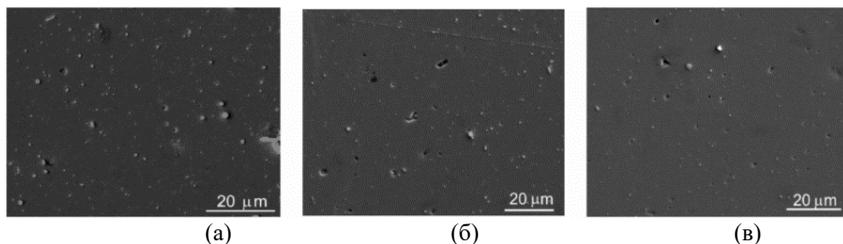


Рис. 1 Микро-изображение поверхности покрытий Mo-S-C-H, полученных методом РИЛО при давлениях H_2S (а) 5,5, (б) 9, (в) 18 Па.

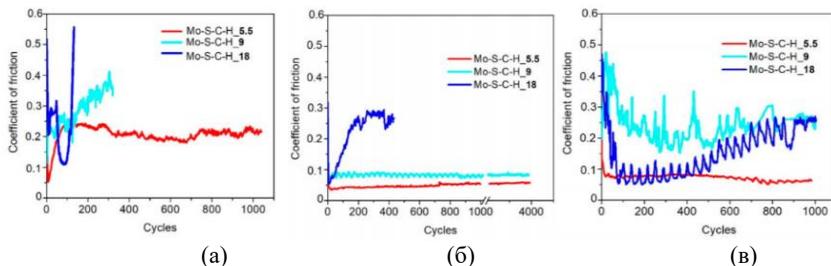


Рис. 2 – Зависимости коэффициента трения от числа циклов тонкоплёночных покрытий Mo-S-C-H, полученных методом РИЛО при различных давлениях H_2S (5,5; 9 и 18 Па) и при различных значениях влажности и температуры (а) 58%, $22^\circ C$, (б) смесь воздуха и аргона, влажность 8%, $22^\circ C$, (в) влажность 8%, $-100^\circ C$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-19-00081).

Список литературы

1. Fominski V. Yu., Romanov R. I., Fominski D. V., Novikov S. M., Chesnokov A. V. // Journal of Friction and Wear. 2020, Vol. 41, №1, pp. 18–24.

К.С. ГРИШАКОВ, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

УСТОЙЧИВАЯ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ НОВАЯ ФАЗА ПОЛИМЕРНОГО АЗОТА

В рамках первопринципных расчетов обнаружена новая кристаллическая фаза азота, обладающая симметрией кристаллической решетки P-62c и устойчивая в отсутствии внешнего давления. Представлены результаты исследования ее структурных, энергетических, механических, электронных и фононных свойств при различных температурах и давлениях. Проведено сопоставление полученных результатов с известными в литературе фазами азота, стабильными в области низких давлений.

K.S. GRISHAKOV, N.N. DEGTYARENKO

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

A NEW PHASE OF POLYMER NITROGEN STABLE AT LOW PRESSURES

A new crystalline phase of nitrogen with the symmetry of the P-62c crystal lattice and stable in the absence of external pressure was discovered in the framework of *ab initio* calculations. The results of the study of its structural, energy, mechanical, electronic and phonon properties at various temperatures and pressures are presented. The obtained results are compared with the nitrogen phases known in the literature, which are stable at low pressures.

В настоящее время актуальной является проблема поиска материалов с высокой плотностью запасаемой энергии. Причина выбора азота в качестве элемента для создания материалов с высокой плотностью запасаемой энергии заключается в том, что для азота сумма энергий трех одинарных связей существенно меньше энергии тройной связи. Таким образом, создавая азотосодержащее вещество, в котором атомы азота связаны друг с другом одинарными связями, запастись большое количество энергии. Расчетная эффективность полимерного азота в качестве материала с высокой плотностью запасаемой энергии, по крайней мере, в несколько раз выше, чем для других высокоэнергетических веществ, известных к настоящему времени. В отличие от этих «обычных» высокоэнергетических веществ предполагаемым чисто азотным структурам с одинарной связью для распада не требуется окислителя, а выделение энергии является экологически чистым процессом, поскольку в результате распада образуются устойчивые азотные молекулы. Благодаря компактности и высокой энергоемкости полимерный атомарный азот смог бы

потеснить традиционные способы хранения энергии – аккумуляторы высокой емкости и водород.

В настоящей работе в рамках первопринципных расчетов, базирующихся на теории функционала плотности, обнаружена новая кристаллическая фаза азота, обладающая симметрией кристаллической решетки P-62c и устойчивая (динамически и механически) в отсутствии внешнего давления. Фононный спектр и плотность числа состояний фазы P-62c в отсутствии внешнего давления представлены на рис. 1. Представлены результаты исследования ее структурных, энергетических, механических, электронных и фононных свойств при различных температурах и давлениях. Проведено сопоставление полученных результатов с известными в литературе фазами азота, устойчивыми в области низких давлениях.

Предсказанная новая фаза азота является прямозонным полупроводником и способна запасать наибольшее количество энергии среди всех известных в литературе на данный момент азотных кристаллов, устойчивых в области низких давлений. Одним из дальнейших направлений работы является поиск методов синтеза подобных азотных структур через возбужденные состояния без необходимости приложения высоких давлений.

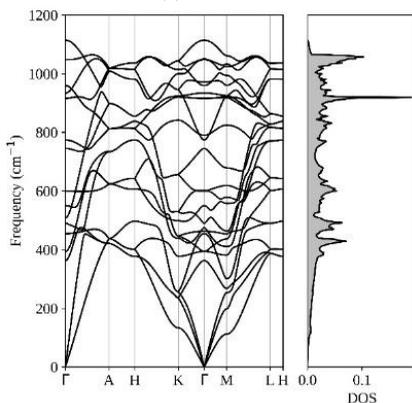


Рис. 1 Фононный спектр и плотность числа фононных состояний для фазы P-62c при нулевом давлении

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № 0723-2020-0036).

Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, К.С. ГРИШАКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ГИДРИД ГЕРМАНИЯ СО СТРУКТУРОЙ A15

Методом функционала плотности исследована возможность образования гидрид германия со структурой a15. Показано, что гидрид германия Ge_2H_6 со структурой A15 обладает устойчивостью в некотором интервале давлений около 125 ГПа. Представлены результаты расчетов структурных, энергетических характеристик, электронных, фоновых спектров нормальной фазы. Дана оценка критической температуры сверхпроводящего перехода.

N.N. DEGTYARENKO, K.S. GRISHAKOV

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

SUPERCONDUCTING GERMANIUM HYDRIDE WITH A15 STRUCTURE

The possibility of the formation of germanium hydride with the structure a15 is investigated by the density functional method. It is shown that germanium Ge_2H_6 hydride with the A15 structure has stability in a certain pressure range of about 125 GPa. The results of calculations of the structural, energy characteristics, electronic, and phonon spectra of the normal phase are presented. The critical temperature of the superconducting transition is estimated.

Актуальной задачей является поиск новых высокотемпературных сверхпроводящих материалов (ВТСП) с высоким содержанием водорода, у которых переход в сверхпроводящее состояние происходит в условиях, близких к нормальным (нормальное давление и комнатная температура). Решение этой задачи возможно только при совместном развитии теоретических представлений, компьютерного моделирования и получении новых экспериментальных данных. Очевидная общая тенденция – все высокотемпературные гидриды (SH_3 , LaH_{10}), также, как и обычные сверхпроводящие соединения со структурой A15 и ВТСП, обладают высокой симметрией решетки. Представляет интерес сравнить свойства гидридов высокого давления и обычных сверхпроводящих соединений с одной и той же структурой, и симметрией, но разным элементным составом.

В данной работе моделирование проводилось в рамках теории функционала плотности в базисе плоских волн, с использованием сохраняющего норму псевдопотенциала.

Впервые показано, что гидрид германия Ge_2H_6 со структурой A15 обладает динамической (по фононам) и механической (по упругим константам решетки) устойчивостью в некотором интервале давлений около 125 ГПа. Характерные особенности фононного спектра колебаний его решетки связаны с изгибными и растягивающими модами цепочек легких атомов водорода, таким образом, средняя частота колебаний оказывается значительно больше, чем у обычных A15 из-за наличия водорода. Для Ge_2H_6 также характерен пик плотности числа электронных состояний вблизи уровня Ферми, как и у обычных A15 (например, Ge_2Nb_6). Константа электрон-фононного взаимодействия λ существенно зависит от электронной плотности состояний $N(E_F)$. В модели БКШ эта связь очень проста: $\lambda = N(E_F)V$, где V – усредненное по поверхности Ферми электрон-электронное взаимодействие за счет обмена фононами. В теории сильной электрон-фононной связи выражение λ значительно сложнее. Расчеты констант электрон-фононного взаимодействия λ и значений критической температуры сверхпроводящего перехода T_c дали следующие результаты, обусловленные приведенными выше особенностями фононных и электронных спектров Ge_2H_6 :

$$\begin{aligned} \text{Ge}_2\text{H}_6 P=150 \text{ ГПа} & \quad \lambda \approx 4.9 \quad \mu^* \approx 0.1 \quad T_c \approx 46 \text{ К}; \\ \text{Ge}_2\text{H}_6 P=200 \text{ ГПа} & \quad \lambda \approx 4.0 \quad \mu^* \approx 0.1 \quad T_c \approx 50 \text{ К}. \end{aligned}$$

Критическая температура оказалась в $2 \div 3$ раза больше, чем у интерметаллидов переходных металлов. Такой сравнительный рост критической температуры T_c сверхпроводимости гидрида германия Ge_2H_6 со структурой A15 обусловлен большим значением константы электрон-фононной связи, связанной с колебательными, изгибными и растягивающими модами цепочек легких атомов водорода. Однако, амплитуда пика плотности s - и p -электронных состояний вблизи уровня Ферми оказывается несколько меньше, чем у s -, p -, d -электронных состояний, например, интерметаллида Ge_2Nb_6 с той же структурой, что, вероятно, препятствует большему росту величины T_c .

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № 0723-2020-0036).

БИ ДУНСЮЭ, У МЭНЮАНЬ, А. КАРАДЖИЧ, В.В. ФИЛАТОВ
Московский государственный технический университет им. Баумана, Россия

ГЛОБУЛЯРНЫЙ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Проанализирован эффект андерсоновской локализации светового поля в микрополостях глобулярного фотонного кристалла. Установлены благоприятные возможности для использования композита в качестве активной среды для получения гигантского комбинационного рассеяния.

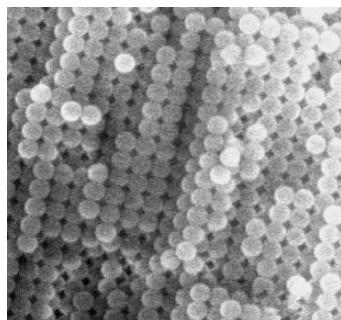
BIDONGXUE, WUMENGYUAN, A. KARAJIC, V.V. FILATOV
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

GLOBULAR PHOTONIC CRYSTAL AS A PERSPECTIVE MEDIUM FOR THE SURFACE-ENHANCED RAMAN SCATTERING

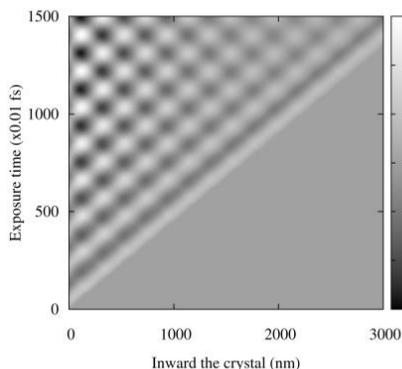
We analyze the Anderson localization of light in the globular photonic crystal. The results show the opportunity to use a globular photonic crystal as an active medium for the surface-enhanced Raman scattering.

Глобулярный фотонный кристалл – наноконпозиционный материал, представляющий собой гранецентрированную кубическую (ГЦК) матрицу, сформированную идентичными сферическими частицами (глобулами), диаметр которых подобран таким образом, чтобы в спектре композита присутствовали запрещенные фотонные зоны (стоп-зоны) оптического диапазона.

При этом внешнее оптическое возбуждение кристалла на частоте, соответствующей краю стоп-зоны, вследствие внутренней (межглобулярной) интерференции приводит к андерсоновской локализации светового поля в межглобулярных порах (микрополостях) ГЦК-структуры, что позволяет использовать фотонный кристалл в качестве перспективной среды для изучения гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) в веществах, введенных в поры композита.



a



б

Рис. 1. Внешний вид глобулярного фотонного кристалла (*a*) и результаты численного моделирования андерсоновской локализации электромагнитного поля в его структуре (*б*)

Как показывает анализ по модели брэгговской дифракции, для получения ГКР на длине волны λ необходимо использовать фотонный кристалл с диаметром глобул

$$D = \lambda \sqrt{3/8} \cdot [(1 - \eta)n_1^2 + \eta n_2^2]^{-1/2},$$

где n_1 – показатель преломления глобулы, n_2 – анализируемого вещества, введенного в поры, $\eta = 0,26$ – пористость ГЦК-решетки.

При этом локальное поле в первой приповерхностной микрополости композита возрастает с увеличением времени экспозиции по закону

$$E = (P/\varepsilon_0 S \lambda)^{1/2} \sqrt{t},$$

где P – мощность возбуждающего источника на длине волны λ , S – площадь светового пятна на поверхности композита, t – время экспозиции.

Таким образом, в глобулярном фотонном кристалле имеются все необходимые условия для получения ГКР, что открывает возможности изучения спектров ГКР различных веществ, вводимых в поры композита.

Работа выполнена при поддержке Китайского совета по стипендиям (China Scholarship Council).

И.А. ЗАВИДОВСКИЙ, О.А. СТРЕЛЕЦКИЙ, О.Ю. НИЩАК,
А.А. ХАЙДАРОВ

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Россия

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ИОННОЙ СТИМУЛЯЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОД- СЕРЕБРЯНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Исследовано влияние энергии ионной стимуляции на структуру и свойства покрытий, синтезированных методом импульсно-плазменного распыления графитовой мишени с серебряными инклюдерами. Покрытия представляли собой аморфную углеродную матрицу, содержащую серебряные нанокристаллические включения. Исследовано воздействие ионного ассистирования на огранку и размер кристаллитов, а также на структуру углеродной матрицы. Представлено обсуждение влияния данных параметров на спектры поглощения полученных пленок.

I.A. ZAVIDOVSKIY, O.A. STRELETSKIY, O.YU. NISHCHAK, A.A.
HAIDAROV

Lomonosov Moscow State University, Russia

ION ASSISTANCE ENERGY INFLUENCE ON STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF CARBON-SILVER NANOCOMPOSITES

Influence of ion assistance on the structure and properties of the coating synthesized by pulse-plasma sputtering of graphite target with silver inclusions was studied. Coatings consisted of amorphous carbon matrix containing silver crystalline inclusions. The impact of ion assistance on crystals faceting and size, as well as on the carbon matrix structure, was investigated. The influence of these parameters on the films absorption spectra was discussed.

В настоящее время представляет значительный интерес исследование пленок аморфного углерода, в который инкапсулированы серебряные включения [1]. Благодаря химической стабильности, твердости и бактериологической активности, а также плазмонным свойствам такие структуры имеют перспективы применения в качестве покрытий для медицинских приложений и подложек для поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии [2]. Существенное изменение плазмонных и биомедицинских свойств покрытий возможно путём вариации параметров осаждения. Вследствие этого актуальной задачей является исследование влияния условий синтеза на структуру получаемых покрытий.

В настоящей работе исследованы покрытия, изготовленные методом импульсно-плазменного распыления графитовой мишени с серебряными инклюдерами. Пленки были синтезированы в атмосфере аргона при давлении 10^{-4}

³ Торр. Во время напыления осуществлялась стимуляция ионами аргона различных энергий.

По результатам просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) частицы серебряных включений имеют два характерных размера – порядка 1-2 нм и порядка 20-50 нм. С ростом энергии стимуляции наблюдается огранка кристаллитов. По данным электронной дифракции, с ростом энергии также увеличивается относительная интенсивность линии, отвечающей межплоскостному расстоянию графита 3.4 Å. Это свидетельствует об увеличении доли sp^2 -гибридизованного углерода с возрастанием энергии стимуляции. Спектры характеристических потерь энергии электронов в окрестности края К-поглощения углерода показывают возрастание интенсивности линии, отвечающей переходу $1s \rightarrow \pi^*$, с ростом энергии стимуляции, что подтверждает данные дифракции.

В спектрах УФ-видимого поглощения полученных образцов наблюдается два пика на ~330 и 440 нм, которые соответствуют возбуждению поверхностных плазмонов в кристаллитах двух характерных размеров. Эти данные находятся в соответствии с результатами ПЭМ. Пик на 440 нм проявляется только для образцов, нанесенных при энергиях, превышающих 300 эВ. По-видимому, это связано с формированием огранки кристаллитов [3]. Наклон спектров образцов, полученных при различных энергиях стимуляции, существенно различается. Эту особенность можно связать с тем, что при увеличении доли графитовых связей в спектрах проявляется широкий пик, отвечающий межзонному $\pi \rightarrow \pi^*$ переходу [4].

Работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС». Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90077.

Список литературы

1. Tamulevičius S., Meškiniš Š., Tamulevičius T., Rubahn H.-G. // Rep. Progr. Phys. 2018. Vol. 81. P. 024501.
2. Streletskiy O.A., Zavidovskiy I. A., Nischak, O.Y., Haidarov, A.A. // Vacuum. 2020. Vol. 175. P. 109286.
3. Sabur A., Havel M. Gogotsi Yu. // J. Raman Spectrosc. 2008. Vol. 39: P. 61–67.
4. Zoubos H., Koutsokeras L.E., Anagnostopoulos D.F. and others // Sol. Energy. Mat. Sol. Cells. 2013. Vol. 117, P. 350–356.

А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ, Г.И. ОМАРБЕКОВА, Т.Е. СЕЙСЕМБЕКОВА

*Карагандинский университет им. академика Е.А. Букетова, Научный Центр
«Нанотехнологии и наноматериалов», Караганда, Казахстан*

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК PEDOT:PSS ПРИ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРА В ПАРАХ СПИРТОВОГО РАСТВОРИТЕЛЯ

Для изменения влияния морфологии поверхности полимера пленку выдерживали в парах с определенной концентрацией этилового и изопропилового спиртов. Сравнительный анализ пленок PEDOT:PSS был проведен методом рентгенофазового анализа. Установлено, что после взаимодействия с парами спиртов цепи PEDOT и PSS переходят из бензоидной структуры в хиноидную, следовательно, после модификации в парах спиртов структура становится более планарной.

A.K.ZEINIDENOV, G.I. OMARBEKOVA, T.E. SEISEMBEKOVA

*Buketov University, Scientific Center «Nanotechnology and Nanomaterials», Qaraghandy,
Kazakhstan*

STRUCTURE CHANGE OF PEDOT: PSS FILMS DURING MODIFICATION OF THE POLYMER IN VAPOR OF ALCOHOLIC SOLVENT

To change the effect of the morphology of the polymer surface, the film was kept in vapors with a certain concentration of ethyl and isopropyl alcohols. Comparative analysis of PEDOT: PSS films was carried out by X-ray phase analysis. It was found that after interaction with alcohol vapors, the PEDOT and PSS chains pass from the benzoic structure to the quinoid structure; therefore, after modification in alcohol vapor, the structure becomes more planar.

Очистка и подготовка подложек проводилась согласно методике [1]. В работе использовали полимер PEDOT:PSS (1%, Ossila A14083), а также спирты Изопропанол и Ethanol (pure 99,9% Sigma Aldrich). Раствор полимера PEDOT:PSS перед нанесением фильтровали через 0,45 микрометровый фильтр. Пленки PEDOT:PSS получали методом spin-coating путем нанесения полимера на поверхность оптического стекла при скорости вращения 5000 об/мин.

Получение рентгенодифрактограмм пленок осуществляли на Rigaku SmartLab X-ray diffraction. Рентгеновские дифрактограммы (XRD) тонких пленок PEDOT:PSS с модификацией в парах этилового и изопропилового спиртов представлены на рисунке 1. Два отдельных пика, наблюдаемых при значениях 2θ на $3,5^\circ$ и $25,6^\circ$ в исходной пленке PEDOT:PSS соответствуют параметрам пространственной решетки d 25,2 Å и 3,5 Å, рассчитанным согласно закону Брэгга $2d\sin\theta = \lambda$ [2].

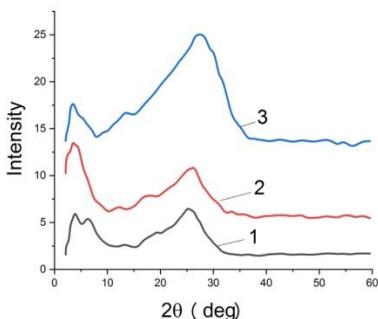


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы (XRD) тонких пленок PEDOT:PSS: 1- PEDOT:PSS, 2- 50% PEDOT:PSS/50% ethanol, 3 - 50% PEDOT:PSS/50% isopropanol

Пик, наблюдаемый при $3,5^\circ$, с пространственной решеткой $25,2 \text{ \AA}$, можно отнести к расстоянию между ламелями ($d = 100 \text{ \AA}$) цепи PEDOT и PSS. После обработки в парах этилового и изопропилового спиртов наблюдается незначительное изменение расстояния между ламелями с $25,2$ до $23,2 \text{ \AA}$ (рисунок 1). Уменьшение расстояния между двумя точками на рентгено-дифрактограмме указывает на то, что цепи PEDOT и PSS переходят из бензоидной структуры в хиноидную, следовательно, после модификации в парах этилового и изопропилового спиртов структура становится более планарной.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08856176).

Список литературы

1. Kim K., Ihm K., Kim B. Surface Property of Indium Tin Oxide (ITO) After Various Methods of Cleaning // Acta Physica Polonica A, Proceedings of the 4th International Congress APMAS2014, April 24-27, 2014, Fethiye, Turkey. – Vol. 127, № 4.
2. X. Wang, A. Kyaw, C. Yin, F. Wang, Q. Zhu, T. Tang, P. Yeea, J. Xu Enhancement of thermoelectric performance of PEDOT:PSS films by post-treatment witha superacid // RSC Adv., 2018, 8, 18334–18340.

Э.М. ИБРАГИМОВА, Ш.Н. БУЗРИКОВ, М.А. МУССАЕВА

Институт ядерной физики АН РУз, Ташкент, Узбекистан

РОСТ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКА NaCl ПРИ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ

Методом рентгеновской дифракции установлено, что при γ -облучении источником ^{60}Co воздухе до 10^5 Р в приповерхностном слое порошка NaCl растет нанопфаза NaH до ~50% за счет потери Cl при радиоллизе.

E.M. IBRAGIMOVA, Sh.N. BUZRIKOV, M.A. MUSSAEVA

Institute of Nuclear Physics AS RUz, Tashkent, Uzbekistan

GROWTH OF NANOSTRUCTURES ON SURFACE OF NaCl POWDER UNDER GAMMA IRRADIATION

It was found by X-ray diffraction technique that ^{60}Co γ -irradiation in air to 10^5 R results in growth of NaH nanophase to ~50% in the subsurface layer of NaCl powder due to Cl loss at radiolysis.

Впервые дополнительная фаза металлического Na была обнаружена в порошке NaCl после рентгеновского облучения как слабый рефлекс [110] при угле 29.5° между главными рефлексами NaCl [111] при 27.3° и [200] при 31.7° в результате диффузии Cl⁻ [1]. Преципитаты Na удлиненной формы 10-30 нм, занимающие объем до 9 % были обнаружены в NaCl кристаллах после облучения пучком 0.5 МэВ электронов до высокой дозы 1.5×10^{11} рад в вакууме при 100 С [2]. Недавно нами впервые установлено влияние ростовой нестехиометрии с дефицитом Cl полированной поверхности (h00) оптически чистого монокристалла NaCl на образование примесных нанопаз NaClO₃ и Na₂O более 80% из-за реакции Na с атмосферным O₂ и только 1% наночастиц Na. При ^{60}Co γ - облучении на воздухе при 320 К дозами от 4×10^5 до 3×10^7 Р происходит радиолиз примесных нанопаз с дополнительной потерей Cl и образованием NaH фазы до 80% в виде наноконусов [3,4].

Чтобы выделить роль поверхности в радиоллизе Cl и фазовых превращениях, в данной работе был экспериментально исследован фазовый состав микропорошка NaCl марки ХЧ до и после гамма-облучения. Рисунок 1 показывает полные спектры рентгеновской дифракции микропорошка NaCl необлученного и после облучения ^{60}Co γ -квантами ~1.25 МэВ при 300 К и 140 Р/с дозой 10^5 Р. Видно, что приповерхностный слой исходного порошка неоднородный, а облучение привело только к изменениям относительных интенсивностей сильных и слабых рефлексов.

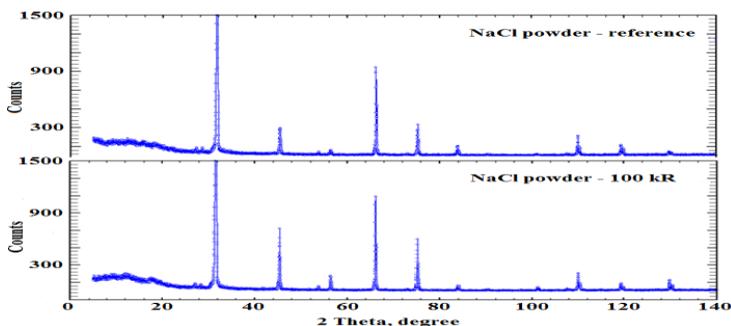


Рис. 1. Полные спектры рентгеновской дифракции порошка NaCl до и после гамма-облучения при 300 К и 140 Р/с дозой 10^5 Р

Фазовый состав необлученного и гамма-облученного 10^5 Р образцов в % объема приведен в Таблице.

Фазы, %	NaCl	NaClO ₃	NaOH	NaN	Na ₂ O
Необлученный	36	16	33	14	1
Облученный	20	4	28	46	2

Из Таблицы видно, что в результате облучения объемное содержание металлической фазы NaN растёт за счет радиолиза преимущественно NaClO₃ и NaCl фаз. Сравнение с результатами структурно-фазового анализа кристаллов NaCl показывает, что поверхность играет решающую роль в радиолизе и гамма-облучением можно восстанавливать Na из соли.

Список литературы

- R.G. Fuller. Diffusion of the chlorine ion in potassium chloride // Phys. Rev. 1966. 142. 524–527. doi:https://doi.org/10.1103/PhysRev. 142.524.
- S.N. Sulyanov, D.M. Kheiker, P.V. Dorovatovski, A.V. Sugonyako, D.I. Vainshtein, H.W. denHartog // J. Phys. Condens. Matter. 2007. 19. 246210.
- Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Муссаева М.А., Искандаров Н.Э. Элементный состав и дефекты структуры гамма облученных кристаллов NaCl. VI Республиканская Конференция Молодых физиков Узбекистана «Ядерная физика и ядерные технологии». 1-2 декабря, 2020 г. РКМФУ-2020. С. 157–167.
- Ибрагимова Э.М., Бузриков Ш.Н., Искандаров Н.Э., Муссаева М.А. Радиолиз и структурные преобразования поверхности кристалла хлорида натрия при гамма-облучении. // УФЖ. 2020. 22. № 5. С.

**Н.А. ИВАНОВА, А.А. ЗАСЫПКИНА, Е.В. ЯСТРЕМСКИЙ,
Р.А. КАМЫШИНСКИЙ, В.В. ТИШКИН, О.К. АЛЕКСЕЕВА**

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

НАНЕСЕНИЕ Тi-ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КИСЛОРОДНОГО ЭЛЕКТРОДА ОБРАТИМОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В работе рассмотрены режимы магнетронного распыления защитного титанового покрытия в атмосфере различного состава для кислородного электрода обратимого топливного элемента с твердым полимерным электролитом. Использовали три режима распыления: прямого тока (DC), со смещением напряжения (DCV) и импульсном (IM). Также распыление проводили в атмосфере аргона и воздуха. Использование различных режимов распыления позволило контролировать структуру получаемого наноразмерного покрытия. Полученная в режиме DC структура покрытия позволяет успешно использовать его для повышения коррозионной стойкости электрода.

**N.A. IVANOVA, A.A. ZASYPKINA, E.V. YASTREMSKY,
R.A. KAMYSHINSKY, V.V. TISHKIN, O.K. ALEKSEEVA**

National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Ti -COATING FORMED BY MAGNETRON SPUTTERING FOR THE OXYGEN ELECTRODE OF REVERSIBLE FUEL CELL

The paper deals with the titanium coating formed by the magnetron sputtering for an oxygen electrode of a reversible fuel cell with a solid polymer electrolyte. Three sputtering modes were used: direct current (DC), direct current with displacement voltage (DCV) and pulsed mode (IM). Sputtering was also carried out in an argon and air atmosphere. The use of various sputtering modes provides to control the structure of the resulting nano-sized coating. The structure of the coating obtained in the DC mode successfully use to increase the corrosion resistance of the electrode.

Обратимый топливный элемент с твердым полимерным электролитом (ОТЭ с ТПЭ) объединяет режимы топливного элемента для генерации энергии и электролизера для генерации водорода в экологически чистом, возобновляемом источнике энергии.

В ТЭ в качестве газодиффузионного слоя (ГДС) используется углеродная бумага или ткань, покрытая гидрофобным микропористым слоем (МПС). Для электролизера функцию ГДС выполняет спеченная титановая пластина из мелкого титанового порошка [1]. Эффективная эксплуатация батареи ОТЭ в режиме генерации водорода, как и в режиме генерации электроэнергии, требует оптимизации используемых ГДС, обеспечивающих высокую эффективность

подвода и отвода реагентов в обоих режимах, а также коррозионную стойкость. Углеродная бумага/ткань подвержена коррозии в процессе окисления углерода кислородом на платиновых катализаторах, связанном с высоким потенциалом на кислородном электроде. Одним из перспективных решений данной проблемы является нанесение защитного покрытия состава TiO_x/TiN_y на углеродную бумагу/ткань с помощью магнетронного распыления.

В данной работе титановое покрытие наносили с помощью магнетронного распыления в различных режимах: прямого тока (DC), со смещением напряжения (DCV) и импульсном (IM). Применение различных режимов позволяет контролировать структуру покрытия, его плотность, пористость, размер распыленных частиц и агломератов. Структура покрытия, полученного в различных режимах распыления, представлена на рисунке 1.

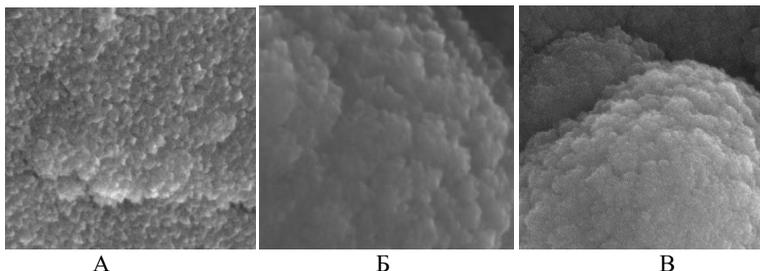


Рис. 1. СЭМ изображения титанового покрытия, полученного в различных режимах: А – DC, Б – DCV, В - IM.

В режиме DC получено покрытие с четко сформированной угловатой гексагональной структурой титана [2]. Размер агломератов 20-50 нм. Полученная структура покрытия позволяет успешно использовать его в качестве защитного для повышения коррозионной стойкости электродов.

Список литературы

1. Grigoriev S.A., Millet P., Volobuev S.A., Fateev V.N.// Int. J. of Hydrogen Energy. 2009. Vol. 34, № 11, P. 4968-4973.
2. Fang S.-Y., Teoh L.G., Huang, R.-H. and others// Int. J. of Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39, № 36, P. 21177-21184.

Х.М. ИЛИЕВ¹, М.О. ТУРСУНОВ², С.А. ТАЧИЛИН¹

¹Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан

²Термезский государственный университет, Узбекистан

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ МАРГАНЦЕМ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ КИСЛОРОДА В КРЕМНИИ

Определено, что уменьшается концентрация кислорода в образцах, легированных марганцем, что позволяет получить материал с термостабильными параметрами для создания электронных устройств.

Х.М. ILIEV¹, М.О. TURSUNOV², S.A. TACHILIN¹

¹Tashkent state technical University, Uzbekistan

²Termez State University, Uzbekistan

INFLUENCE OF DOPING WITH MANGANESE ON THE CONCENTRATION OF OXYGEN IN SILICON

It was determined that the concentration of oxygen in samples doped with manganese decreases, which makes it possible to obtain a material with thermostable parameters for creating electronic devices.

Как известно, количество термических и радиационных дефектов в кремнии в основном определяется концентрацией оптически активного кислорода. Атомы марганца в кремнии имеют достаточно высокую растворимость у поверхности $N \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, сравнимую с кислородом и в основном находятся в электронейтральном состоянии [1].

Оценка содержания кислорода (концентрации атомов оптически активного междоузельного кислорода $N_{\text{O}}^{\text{опт}}$) производилась по спектрам ИК-пропускания в области 1106 см^{-1} (9 мкм), измеренным на инфракрасном спектрометре ФСМ-1202 при комнатной температуре (рис.1). Оценка концентрации $N_{\text{O}}^{\text{опт}}$ производилась по методике [2]. В качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний р-типа с $\rho = 3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, полученный методом Чохральского. В этих образцах концентрация оптически активного кислорода составляла $N_{\text{O}_2} = (5 \div 6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Размеры образцов $1 \times 4 \times 0,8 \text{ мм}^3$.

Диффузия марганца проводилась из газовой фазы в откачанных кварцевых ампулах с остаточным давлением не более $P \sim 10^{-4} \text{ мм. рт.ст.}$ Диффузия проводилась при температуре $T = 1300^\circ\text{C}$. Время диффузии было 30 минут. Диффузия проводилась по технологии [3,4], позволяющей исключить эрозию поверхности образцов.

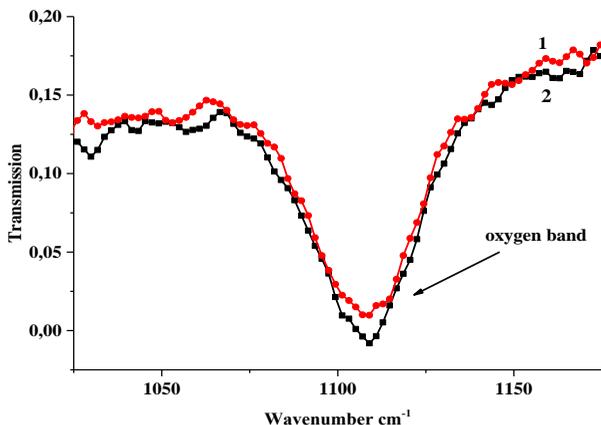


Рис. 1. Зависимость относительной величины пропускания света образцов, легированных марганцем, от длины волны падающего излучения: 1 – образец Si<Mn>, 2- контрольный образец.

Результаты показывают, что концентрация кислорода в образцах, легированных марганцем, уменьшается. Поэтому можно предполагать, что легирование марганцем существенно уменьшит образование термо-доноров, что позволит получить кремний с высокостабильными параметрами для создания электронных устройств.

Список литературы

1. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Исамов С.Б., Тачилин С.А., Зикриллаев Н.Ф., Ибодуллаев Ш.Н., Турсунов М.О. Особенности фотоэлектрических свойств кремния с нанокластерами атомов марганца в области $\lambda=1,5...2,5$ мкм // Приборы. Россия, 2019. Т.231. вып 10. 52-55.
2. Бабич.М.Б., Белецкан.Н.И., Е.Ф.Венгер., Кислород в монокристаллах кремния. // Киев. 1997.
3. Утамуродова Ш.Б., Эргашев Р.М., Матжонов Х.Ж. ИК-спектроскопия кремния, легированного оловам и марганцем. // Журнал физика и полупроводников и микроэлектроника. Тошкент. 2019. Т. 1. вып. 1. С. 27-31
4. Бахадырханов М.К., Мавлянов Г.Х., Исамов С.Б., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Сапарниязова З.М., Тачилин С.А. Электрофизические свойства кремния, легированного марганцем методом низкотемпературной диффузии // Неорганические материалы. 2011. Т 47. № 3. С. 545-550.

Э.З. ИМАМОВ¹, Р.А. МУМИНОВ², Х.Н. КАРИМОВ¹,
М.А. АСКАРОВ³.

¹ТУИТ, Ташкент, Узбекистан

²ФТИ АН, НПО «Физика-Солнце», Ташкент, Узбекистан

³ККТУ, Нукус, Узбекистан

КРЕМНИЕВЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ С НАНО РАЗМЕРНЫМИ ГЕТЕРОПЕРЕХОДАМИ

Рассмотрен вопрос физики роста и создания наноразмерных гетеропереходов методом молекулярно лучевой эпитаксии на поверхности кремниевого солнечного элемента (СЭ). Определены требования к контактирующим материалам, обеспечивающие оптимальные эксплуатационные параметры преобразования солнечного излучения

E.Z.IMAMOV¹, R.A.MUMINOV², KH.N.KARIMOV¹,
M.A.ASKAROV³

¹TUIT, Tashkent, Uzbekistan

²PhTI AS, of the NGO «Physics-Sun», Tashkent, Uzbekistan

³KRSU, Nukus, Uzbekistan

SILICON SOLAR CELL WITH NANOSCALE HETEROJUNCTIONS

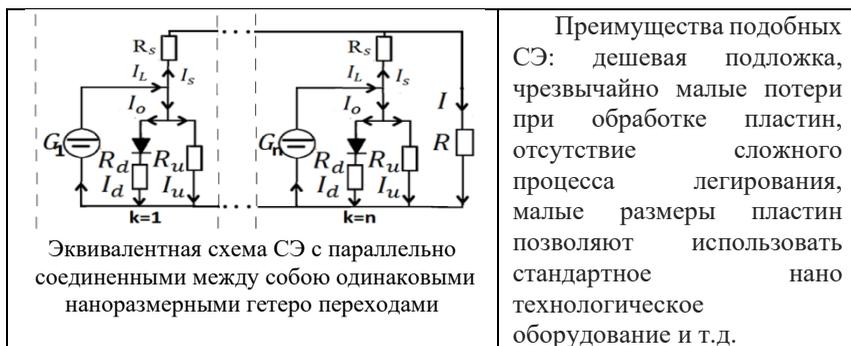
The question of the physics of growth and the creation of nanoscale heterojunctions by molecular beam epitaxy on the surface of a silicon solar cell is considered. The requirements for contacting materials that provide optimal operational parameters of solar radiation conversion are determined.

На протяжении ряда лет нами изучается возможность разработки эффективных, дешевых, устойчивых и долговечных СЭ. В работе повышение эффективности СЭ рассмотрено в аспекте спользования в качестве его подложки относительно дешевых образцов Si. Столь амбициозное решение проблемы оказалось возможным [1] благодаря нано технологическому воздействию на Si и созданию на его поверхности нано размерных *p-n* переходов. Основным технологическим приемом создания наноразмерных гетеропереходов выступает метод молекулярно лучевой эпитаксии (МЛЭ) [2]. Он обеспечивает выращивание на поверхности плотного массива локальных островковых квантовых точек и позволяет спонтанно формировать равновесные, периодически упорядоченные, когерентно напряженные, трехмерные нанокластеры из другого узкозонного полупроводникового соединения на поверхности «широкозонного» Si.

Физика такого роста когерентных нано кластеров, обусловленная дальнедействующими полями упругих напряжений контактирующих поверхностей, основана на фундаментальном эффекте самоорганизации [3].

Фото-преобразующие свойства рассматриваемых СЭ на подложке из дешевого Si, будут мало отличаться от идеальных высокоэффективных СЭ со строго монокристаллической подложкой и, как показано в работе, такое возможно вне зависимости от качества кремния, который может быть даже неупорядоченным некристаллическим и дешевым.

Из рассмотрения эквивалентной схемы можно понять, почему разделенный на много малых гетеропереходов СЭ [4] имеет столь высокие фото, преобразующие свойства.



Более подробное изложение материала будет осуществлено в ходе самой конференции.

Список литературы

1. Jalalov T. A., Imamov E. Z., Muminov R. A., Rakhimov R. H. /Expanding the spectrum of effective absorption of solar cells with nano inclusions /J.Computational nanotechnologies /2018. Issue No. 1, pp. 155-167)
2. Shchukin V.A., Ledentsov N.N., Kopyev P.S., Bimberg D. /Spontaneous ordering of arrays of coherent stressed islands / phys. Lett. 1995. V.75. No 16. P. 2968-2971.
3. H. Haken /Synergetics /Springer, Berlin-Heidelberg, 1967.
4. Tsoi Bronya / Ep2405487 A1-Patent in the Eurasian Patent Office. 2012.08.30.

Р.Ш. ИХСАНОВ, Е.А. МАЗУР, М.Ю. КАГАН

Московский институт электроники и математики Высшей школы экономики, Москва, Россия

КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ЭЛИАШБЕРГА НА МНИМОЙ ОСИ

Представлен комплекс компьютерных программ для решения системы уравнений Элиашберга, описывающих переход металла в сверхпроводящее состояние. В работе используется вариант системы уравнений Элиашберга, записанных на мнимой оси, представленный в двух вариантах: без учета поправки на химический потенциал электронов и с учетом этой поправки. Расчеты проведены для фазы I_{41}/amd металлического водорода, находящейся под давлением 500 ГПа.

R.SH. IKHSANOV, E.A. MAZUR, M.YU. KAGAN

¹Higher School of Economics Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, Russia

SOFTWARE PACKAGE FOR SOLVING A SYSTEM OF ELIASHBERG EQUATIONS ON AN IMAGE AXIS

Software package to solve the system of Eliashberg equations that describes the transition of a metal to a superconducting state is presented. We use a version of the Eliashberg system of equations written on the imaginary axis. The system is presented in two versions: without taking into account the correction for the chemical potential of electrons and with taking into account this correction. The calculations were performed for the I_{41}/amd phase of metallic hydrogen at a pressure of 500 GPa.

В работе представлен комплекс программ для решения уравнений Элиашберга, основных уравнений электрон-фононной теории [1], записанных на мнимой оси для изотропных сверхпроводников. Для выбранного сверхпроводника в программах рассчитывается температура сверхпроводящего перехода T_C и ряд свойств: параметр электрон-фононного взаимодействия λ , постоянная Зоммерфельда γ , характеристическая фононная частота ω_{in} , величина сверхпроводящей щели при 0 К $\Delta(0)$, верхнее критическое магнитное поле при 0 К $H_C(0)$, скачок теплоемкости $\Delta C(T_C)$, изотопный коэффициент β .

Система уравнений наиболее общего вида из всех, решаемых в работе, записывается относительно набора переменных $\{\varphi_n, Z_n, \chi_n\}_{n=0}^M$, где M – максимальный номер мацубаровской частоты, φ – параметр порядка, Z –

функция перенормировки массы электрона, χ – сдвиг химического потенциала, и выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \varphi_n = \frac{\pi}{\beta} \sum_{m=0}^M \{ \lambda_{nm}^{(+)} - 2\mu^* \theta(\omega_c - |\omega_m|) \} \varphi_m N_m \\ Z_n = 1 + \frac{\pi}{\beta} \frac{1}{\omega_n} \sum_{m=0}^M \lambda_{nm}^{(-)} \omega_m Z_m N_m \\ \chi_n = -\frac{\pi}{\beta} \sum_{m=0}^M \{ \lambda_{nm}^{(+)} - 2\mu^* \theta(\omega_c - |\omega_m|) \} P_m e_m \end{cases}, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура, μ^* – кулоновский псевдопотенциал, $\beta = (k_B T)^{-1}$, $\alpha^2 F(\omega)$ – функция Элиашберга, $\lambda_{nm}^{(\pm)} = \lambda(n-m) \pm \lambda(n+m+1)$,

$\lambda(n) = \int_0^{\omega_D} \frac{2\omega \cdot \alpha^2 F(\omega)}{\omega^2 + (2\pi n k_B T)^2} d\omega$, ω_D – дебаевская частота, ω_m – мацубаровские

частоты, $N_m = \pi^{-1} \int_{-\mu}^{+\infty} \frac{N_0(E)}{(E + \chi)^2 + Z^2 \omega_m^2 + \varphi^2} dE$, $P_m = \pi^{-1} \int_{-\mu}^{+\infty} \frac{N_0(E)(E + \chi)}{(E + \chi)^2 + Z^2 \omega_m^2 + \varphi^2} dE$, μ – химический потенциал, $N_0(E)$ – плотность электронных состояний в зоне проводимости, $e_m = \omega_m Z / \sqrt{\omega_m^2 Z^2 + \varphi^2}$.

Кроме программы решения системы (1) в работе представлены программы, реализующие решение частных случаев этой системы, записанных без поправки на химический потенциал (приближение Аллена-Дайнса и др.). Так же в работе приведены результаты расчетов, проведенных для фазы I_{41/amd} металлического водорода, находящейся под давлением 500 ГПа [2].

Список литературы

1. Г. М. Элиашберг // ЖЭТФ. 1960, 38(3), С. 966-976.
2. Н. А. Кудряшов, А. А. Кутуков, Е. А. Мазур // Письма в ЖЭТФ. 2016, Т. 104 (7), С. 488–493.

С.Б. КАБИЛДИНА, А.Д. СЫТЧЕНКО,
Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва,
Россия*

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ Zr-B-N, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ DCMS И HIPIMS

В работе методами магнетронного распыления на постоянном токе (DCMS) и высокоомощного импульсного магнетронного распыления (HIPIMS) были получены покрытия Zr-B-N при различном парциальном давлении азота. Изучены структура покрытий, их механические и трибологические свойства, стойкость к ударно-динамическим воздействиям, трещиностойкость и коррозионная стойкость. Был определен оптимальный режим осаждения с точки зрения обеспечения совокупности высоких механических и трибологических характеристик.

S.B. KABILDINA, A.D. SYTCHENKO,
PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF Zr-B-N COATINGS OBTAINED BY DCMS AND HIPIMS METHODS

In this work, the Zr-B-N coatings were obtained by the methods of direct current magnetron sputtering (DCMS) and high-power impulse magnetron sputtering (HIPIMS) at different partial pressures of nitrogen. The structure of coatings, their mechanical and tribological properties, resistance to impact-dynamic loading, crack resistance and corrosion resistance have been studied. The optimal deposition mode was determined from the point of view of providing a combination of high mechanical and tribological characteristics.

Тугоплавкие соединения циркония, такие как ZrB_2 и ZrN благодаря высокой твердости ~35-45 ГПа и износостойкости широко применяются в качестве функциональных покрытий для повышения ресурса работы ответственных деталей техники [1,2]. Введение азота в покрытия ZrB_2 способствует росту твердости на 50 % и износостойкости на 20 % [3].

Целью данной работы является получение покрытий в системе Zr-B-N методами магнетронного распыления на постоянном токе (DCMS) и высокоомощного импульсного магнетронного распыления (HIPIMS) при варьировании парциального давления азота, изучение их структуры, механических и трибологических характеристик, стойкости к ударно-динамическим воздействиям и трещиностойкости.

Покрытия были получены методами DCMS и HIPIMS с использованием керамической СВС-мишени ZrB_2 в газовых средах 100% Ar, 85%Ar–15% N_2 и 100% N_2 . В качестве подложек использовались Si (100) и быстрорежущая сталь P18. Структурные исследования покрытий выполнялись с помощью СЭМ и ЭДС на комплексе Hitachi S-3400N NORAN 7. РФА покрытий проводился с использованием $CuK\alpha$ излучения на дифрактометре Phaser D2 Bruker. Для определения механических свойств покрытий использовался нанотвердомер Nano-HardnessTester (CSM Instruments). Трибологические испытания покрытий проводились на автоматизированной машине трения Tribometer (CSM Instruments). Испытания на стойкость к циклическим ударно-динамическим нагрузкам осуществлялись с помощью прибора ImpactTesterCemeCon при нагрузке 1000 Н. Для определения геометрических размеров дорожек износа и кратеров после динамических испытаний использовали оптический профилометр WYKO-NT1100 фирмы Veeco. Оценка трещиностойкости покрытий проводилась путём индентирования пирамидой твердомере HVS-50 (Китай) при нагрузках 10 и 50 Н и последующих исследований с помощью оптического микроскопа AxiovertCarlZeiss (Германия) с применением цифровой фотокамеры Cannon 350D. Электрохимические свойства покрытий оценивались с использованием трехэлектродной ячейки с потенциостатом VoltaLab 50 в растворе 1N H_2SO_4 .

Нереакционные покрытия обладали столбчатой структурой ($h-ZrB_2$). Введение азота привело к снижению размера зерна и аморфизации покрытий. Покрытие, осажденное в Ar, характеризовалось твердостью 37 ГПа и высоким коэффициентом трения ~ 0.9 вследствие хрупкого разрушения в условиях трибоконтакта. Увеличение концентрации азота способствовало значительному росту износостойкости и снижению коэффициента трения до 0.4. Переход от DCMS к HIPIMS привел к заметному улучшению трибологических характеристик соответствующего состава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-08-00187.

Список литературы

1. Tengdelius L., Broitman E., Lu J., et al. // ActaMaterialia. 2016. V. 111. P. 166-172.
2. Pilloud D., Dehlinger A.S., et al. // Surface and Coatings Technology. 2003. P. 338-344.
3. Dong, Yu, Tie-Gang, et al. // Procedia Manufacturing. 2018. P. 806-817.

М.Ю. КАГАН^{1,3}, Е.А. МАЗУР²

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

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

³*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва, Россия*

БОЗОННЫЙ МЕТАЛЛ В ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ С ПРИТЯЖЕНИЕМ В ПРИСУТСТВИИ СИЛЬНОГО СЛУЧАЙНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Рассчитаны свойства двумерной электронной системы с низкой плотностью ($n \ll 1$) с сильным локальным притяжением Хаббарда $U > W$ (W – ширина зоны) в присутствии сильного случайного потенциала V , равномерно распределенного в диапазоне от $-V$ до $+V$. В рамках подхода Боголюбова-де-Женны наблюдали появление однородных состояний пространственно разделенной Ферми-бозе смеси куперовских пар и неспаренных электронов с образованием капель бозонов разного размера в матрице непарных нормальных электронных состояний.

M. YU. KAGAN^{1,3}, E.A. MAZUR²

¹*National Research University Higher School of Economy, Moscow, Russia*

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

³*P.L. Kapitza Institute for Physical Problems, Moscow, Russia*

BOSONIC METAL AND THE SUPERCONDUCTIVITY IN THE 2D ATTRACTIVE U-HUBBARD MODEL AT LOW ELECTRON DENSITY

The properties of a two-dimensional low density ($n \ll 1$) electron system with strong onsite Hubbard attraction $U > W$ (W is the bandwidth) in the presence of a strong random potential V uniformly distributed in the range from $-V$ to $+V$ are considered. In the framework of the Bogoliubov-de-Gennes approach we observed an appearance of inhomogeneous state of spatially separated Fermi-Bose mixture of Cooper pairs and unpaired electrons with the formation of bosonic droplets of different size in the unpaired fermionic matrix.

В данной работе мы исследовали решетку с 24×24 ячейками с периодическими граничными условиями. Расчет начинается со случайными значениями амплитуды спаривания Δ_i и зависящей от узла перенормировки химпотенциала μ_i на каждом из узлов, после чего выполнялась процедура численной диагонализации полученного гамильтониана. В результате были найдены собственные векторы $u_n(\mathbf{r}_i), v_n(\mathbf{r}_i)$ и собственные значения E_n системы.

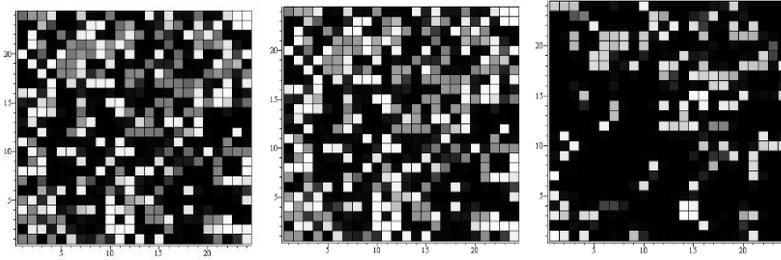


Рис.1. Двумерное распределение электронной плотности (левый столбец), электронно-дырочного перемешивания (средний столбец) и параметра порядка (правый столбец) при $n=0.15$ на 24×24 решетке с амплитудой беспорядка: $V/t = 10.0$.

Хотя мы находимся в области БКШ, для БКШ-БЭК кроссовера электронные пары уже достаточно компактны, они слабо перекрываются и почти касаются друг друга. Таким образом, мы действительно очень близки к пределу, когда пары начинают «раздавливаться» друг друга, то есть к пределу Ферми-Бозе смеси компактных пар и неспаренных одиночных электронов. По мере роста беспорядка пространственное распределение локальной амплитуды спаривания $\Delta(\mathbf{r})$ сначала принимает форму отдельных капель, а затем – отдельных пар.

Список литературы

1. M. Yu. Kagan, *Modern Trends in Superconductivity and Superfluidity, Lecture Notes in Phys.*, v. 874 (Springer, Dordrecht, 2013).

В.А. КАЗАКОВ, А.Г. РАЗИНА, А.В. КОКШИНА

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

КАТОДНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ СЕРЕБРА С АМОРФНЫМ УГЛЕРОДОМ

Рассмотрены процессы роста тонких пленок и нанокластеров серебра, получаемых распылением в плазме аргона при различных температурах подложки и отжига. Показано, что в исследуемых тонких пленках при нагреве от 500К происходит разрушение сплошной пленки с образованием нанокластеров серебра. Наличие углерода позволяет увеличивать толщину пленки, при которой будет происходить кластеризация.

V.A. KAZAKOV, A.G. RAZINA, A.V. KOKSHINA

I. N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

CATHODIC SPUTTERING OF SILVER WITH AMORPHOUS CARBON

The article discusses the growth processes of thin films and nanoclusters of silver obtained by sputtering in argon plasma at different temperatures of the substrate and annealing. It is shown that in the studied thin films, when heated from 500K, the solid film is destroyed to form silver nanoclusters. The presence of carbon in the sample makes it possible to increase the film thickness at which clustering occurs.

Эффект поверхностного плазменного резонанса (ППР) в видимой области спектра, характерный для наночастиц серебра, находит применение для перераспределения энергии внешнего излучения, например, в устройствах фотовольтаики для повышения КПД [1,2]. Кластеры серебра [3] используются в спектроскопии поверхностно усиленного рамановского рассеяния света для анализа углеродных структур и различных биомедицинских применений. Существуют различные методы осаждения наночастиц: осаждение из коллоидных растворов, литографические методы или самосборка частиц на поверхности. Самосборка в кластеры при распылении серебра может происходить либо при синтезе в процессе нагрева подложки, либо при последующей термообработке в результате процессов диффузии и воздействия сил поверхностного натяжения. Размеры образующихся наночастиц серебра зависят от состава и температуры подложки, параметров отжига и толщины пленки[4].

В работе исследуются образцы пленок, осаждаемых при катодном распылении с графитово-серебряной мишени в плазме аргона при напряжении 2кВ и давлении в камере 10 Па. Катод представляет собой графитовую поверхность размером 50х50 мм, на которой находятся вставки из серебра. Площадь поверхности $S_{\text{серебра}}$ составляет менее 5% от $S_{\text{графита}}$.

После отжига и кластеризации пленки проявляют эффект ППР в диапазоне от 400 до 500 нм. При этом размеры кластеров определяют положение максимума полосы поглощения. На рис. 1 показаны спектры оптического пропускания пленок серебра с углеродом при изменении количества серебра в графитовой мишени.

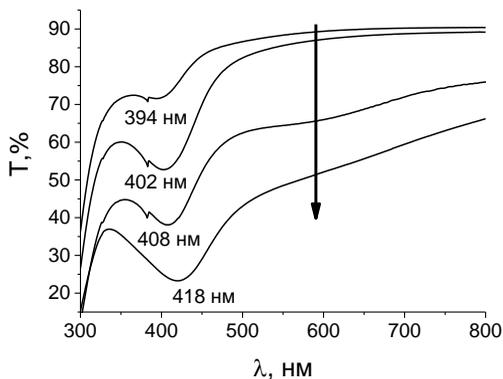


Рис. 1. Спектры пропускания пленок Ag-Sn поверхности стекла после отжига при температуре 690К. Стрелкой показаны направление увеличения содержания серебра на графитовой мишени от ~ 0,2 до 5%

Как видно из рисунка 1, при увеличении количества серебра положение максимума поглощения смещается в сторону больших длин волн. Аналогичный эффект появляется при увеличении температуры подложки.

Список литературы

1. Lükermann F, Heinzmann U and Stiebig H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100**.
2. Ferry V E, Polman A and Atwater H A 2011 Light trapping in plasmonic solar cells *Opt. InfoBase Conf. Pap.* **18** 237–45.
3. Chen Y C, Young R J, Macpherson J V. and Wilson N R 2007 Single-walled carbon nanotube networks decorated with silver nanoparticles: A novel graded SERS substrate *J. Phys. Chem.* **C111** 16167–73.
4. Леонов Н Б, Гладских И А, Полищук В А and Вартамян Т А 2015 Эволюция оптических свойств и морфологии тонких металлических пленок в процессах роста и отжига *Оптика и спектроскопия* **119** 458–63.

П.Ф. КАРЦЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ДИНАМИКА АННИГИЛЯЦИИ АТОМОВ ПАРАПОЗИТРОНИЯ В СОСТОЯНИИ БОЗЕ-КОНДЕНСАТА

Исследуется перспективная схема гамма-лазера, использующего когерентную аннигиляцию охлажденных атомов позитрония в состоянии бозе-конденсата. Представлено описание процесса аннигиляции в случае протяжённого конденсата. Приведены результаты численного моделирования для реалистичных значений параметров задачи.

P.F. KARTSEV

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

ANNIHILATION DYNAMICS OF PARAPPOSITRONIUM ATOMS IN THE STATE OF BOSE-CONDENSATE

The promising scheme of gamma ray laser, based on the coherent annihilation of cold positronium atoms in the state of Bose-Einstein condensation, is studied. The description of annihilation process is presented for the case of long condensate. The results of numerical simulation for realistic problem parameters are presented.

Позитроний – водородоподобный атом, представляет собой связанное состояние электрона с античастицей – позитроном. Время жизни атома позитрония до аннигиляции различается на три порядка, в зависимости от спинового состояния. Короткоживущее синглетное состояние (парапозитроний) распадается на два гамма-кванта противоположных импульсов с энергией каждого, равной 511 кэВ. Узкий спектр последних представляет интерес для создания мощного гамма-источника на этой частоте, основанного на аннигиляции позитрония в состоянии бозе-конденсата [1,2,3]. Для этого предполагается использовать достаточно мощный источник позитронов, которые тормозятся в веществе и образуют с электронами связанные атомы, захватываемые далее в микропорах вещества. Хотя короткоживущий синглетный позитроний почти сразу теряется, долгоживущий триплетный вариант имеет достаточно времени для охлаждения ниже температуры бозе-конденсации, которая при экспериментально достижимой концентрации 10^{20} см^{-3} составляет около 300К. После этого радиочастотным импульсом определённой длительности можно перевести долгоживущие триплетные атомы в короткоживущие синглетные [1]. Это приведёт к большому числу синглетных атомов в одном квантовом состоянии, которые далее при когерентной

аннигиляции создадут мощный импульс гамма-квантов с энергией 511 кэВ. В работе [2] на основе простой однородной модели были получены оценки для коэффициента усиления гамма-излучения в бозе-конденсате позитрония и предложено использовать вытянутую форму конденсата, определяющую направление лазерной генерации.

В данной работе рассмотрено пространственно-неоднородное распределение конденсата и электромагнитного поля. Сформулирована система нелинейных уравнений, описывающих динамику процесса в конденсате конечных размеров. Приведены результаты численного моделирования, демонстрирующие генерацию гамма-импульсов сложной формы и различную эффективность преобразования в случае конденсатов различной длины и концентраций газа. Показано, что при достаточной длине конденсата возникают осцилляции, периодически конвертирующие атомы конденсата в когерентное гамма-излучение и обратно. Приведён профиль генерируемого импульса и спектр излучения.

Представленные результаты позволяют подробно описать процесс генерации и определить параметры планируемых экспериментов.

Список литературы

1. Yi-Hsieh Wang, Brandon M. Anderson, and Charles W. Clark // *Phys. Rev. A* **89**, 043624 (2014)
2. H. K. Avetissian, A. K. Avetissian, and G. F. Mkrtchian // *Phys. Rev. A* **92**, 023820 (2015)
3. A. P. Mills Jr. // *Phys. Rev. A* **100**, 063615 (2019)

О.В. КАШУРНИКОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

АНАЛИЗ EXAFS-СПЕКТРОВ ГАФНАТОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ (DY, GD, LA) МЕТОДОМ ОБРАТНОГО МОНТЕ-КАРЛО

Методом обратного Монте-Карло проанализированы EXAFS-спектры нанопорошков $\text{Ln}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln}=\text{Dy}, \text{Gd}, \text{La}$), полученных при температурах отжига от 600 до 1600°C, с предполагаемой структурой флюорита или пирохлора, а также их смеси. Получены характеристики структурного и термального беспорядка в этих системах.

O.V. KASHURNIKOVA

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

REVERSE MONTE-CARLO ANALYSIS OF RARE-EARTH METAL (Dy, Gd, La) HAFNATES EXAFS SPECTRA

The EXAFS spectra of $\text{Ln}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln}=\text{Dy}, \text{Gd}, \text{La}$) nanopowders are modelled by reverse Monte-Carlo method. Hafnates synthesized at annealing temperatures 600-1600°C were supposed to be of fluorite or pyrochlore structures in mixture. The features of structural and thermal disorder in these systems are studied.

Спектры тонкой структуры рентгеновского поглощения (EXAFS-спектры) гафнатов редкоземельных металлов $\text{Ln}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln}=\text{Dy}, \text{Gd}, \text{La}$) исследованы с помощью программы EvAX[1], моделирующей структуру соединения методом обратного Монте-Карло на основе EXAFS-спектров. В отличие от выполняющей ту же задачу программы RMC++ [2], эта программа ориентирована на анализ термического и структурного беспорядка в системах с кристаллическим порядком, что важно для исследования фазового перехода флюорит-пирохлор в $\text{Ln}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$.

Использованы соединения и их спектры, полученные и исследованные с участием автора в работах [3,4], а также в работах [5,6,7]. Данные обычной и аномальной дифракции показывают, что по мере отжига при температурах от 600 до 1600°C сначала образуется структура флюорита, а затем при различных температурах начинается образование структуры пирохлора в виде нанокристаллической примеси в возросших до 50-100 нм кристаллитах флюорита. Согласно обычному EXAFS-анализу, фаза флюорита является дефектной: в силу различия ионных радиусов Ln и Hf межатомные расстояния Ln-O и Hf-O различались почти на 0.3 Å, что говорит о некотором локальном искажении структуры. Данный эффект наблюдался с самого начала

кристаллизации, задолго до появления дифракционных рефлексов пирохлора, в том числе для гафната диспрозия, где структура пирохлора не наблюдалась в данном диапазоне температур отжига с помощью дифракции. EXAFS-спектроскопия чувствительна к усредненной локальной структуре вблизи Lp и Hf, в отличие от дифракции, исследующей периодическую структуру. В случае флюорита эти катионы должны располагаться в ГЦК-подрешетке разупорядоченным образом, что исключает детектирование различной структуры с помощью дифракционных рефлексов до начала формирования упорядоченной структуры, свойственной пирохлору. При этом расстояния Lp-O и Hf-O близки к таковым у структуры пирохлора, что позволяет судить о высокой роли такой кластеризации в упорядочении.

Обычный EXAFS-анализ структуры флюорита затруднен необходимостью анализа большого числа возможных кластеров и сложностью математической модели; при этом трудно связать результаты с данными дифракции, наложить ограничения, свойственные кристаллической структуре. Особенно затруднен анализ катионного окружения Lp/Hf в связи с наложением ряда дополнительных откликов структуры.

С помощью метода Монте-Карло были получены парные функции распределения атомов в диапазоне до 6 Å. По расщеплению кислородного окружения катионов можно определить долю фаз пирохлора и флюорита. Стало возможно точнее воспроизвести катионное окружение. Определена мера теплового беспорядка различных типов атомов и их смещения из структурных позиций в разных типах окружения. Проанализированы изменения структуры в зависимости от температуры отжига и редкоземельного элемента. Это позволяет уточнять структурную модель систем типа флюорит-пирохлор и определять долю различных фаз в синтезированных нанопорошках.

Список литературы.

1. J. Timoshenko, A. Kuzmin, J. Purans // J. Phys.: Condens. Matter 2004. Vol.26, p.055401.
2. R.L.McGreevy, L.Puzstai // Molec.Simul. 1988. V.1, P.359
3. В.В. Попов и др. // Физика и химия стекла 2011. Т.37, №5, с.51.
4. В.В.Попов и др. // Журнал неорганической химии 2011. Т.56, №10, с.1617.
5. В.В.Попов и др. // Журнал неорганической химии 2013. Т.58, №12, с.1564.
6. В.В.Попов и др. // Журнал неорганической химии 2015. Т.60, №1, с.18.
7. V.V.Popov et al. // J. Phys.: Conf. ser. 2016. V.747, 012043.

А.О. КИРИЛЛОВ, Р.Д. КАПУСТИН, В.И. УВАРОВ

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова РАН, Черноголовка, Россия*

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНВЕРТЕРОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ДЕГИДРИРОВАНИЯ ЭТИЛБЕНЗОЛА В СТИРОЛ

Синтезирован пористый керамический каталитически активный конвертер на основе крупнодисперсного карбида кремния. Для синтеза конвертера в исходный порошок SiC вводились связки и упрочняющие добавки окиси магния, кремния, а также ультрадисперсного карбида кремния. Установлено, что открытая пористость в материале конвертера порядка 42%, а размер пор от 4 до 6 мкм. В процессе дегидрирования конверсия этилбензола составила ~ 73 %, выход стирола ~ 9 %, селективность по стиrolу ~ 12.3 %, при 600°C. Степень зауглерожности катализатора не превысила ~ 0.003 мас. % за 6 ч эксперимента, что является уникально низким показателем.

A.O. KIRILLOV, R.D. KAPUSTIN, V.I. UVAROV

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian
Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

PRODUCTION OF POROUS CERAMIC CONVERTERS BASED ON SILICON CARBIDE FOR THE DEHYDROGENATION OF ETHYLBENZENE INTO STYRENE

A porous, catalytically active converter based on silicon carbide has been synthesized. To synthesize the converter, ultradisperse additives of magnesium oxide and silicon carbide were introduced into the initial SiC powder. The open porosity was about 40%, and the pore size was from 4 to 6 microns. The conversion of ethylbenzene was ~ 73 %, the yield of styrene ~ 9 %, the selectivity for styrene ~ 12.3 %, at 600°C. The degree of carburization of the catalyst did not exceed ~ 0.003 wt. % for 6 hours of the experiment, which is a uniquely low indicator.

Работа посвящена получению пористых керамических каталитических конвертеров на основе SiC методом статического прессования и технологического горения для дегидрирования этилбензола в стирол.

В настоящее время стирол является важнейшим мономером, используемым для получения многочисленных видов полимеров, таких как полистирол, пенопласт, АБС (акрилонитрил-бутадиен-стирол) и САН (стирол-акрилонитрил). Главной проблемой промышленного синтеза стирола являются энергозатратные, низкоселективные промышленные технологии с многочисленными побочными реакциями с образованием газообразных продуктов превращения этилбензола, таких как толуол, бензол, этан, метан, оксиды углерода, которые впоследствии взаимодействуют между собой и образуют большое количество разнообразных токсичных веществ.

Решению этих проблем во многом будет способствовать предлагаемая разработка оригинального каталитического конвертера дегидрирования этилбензола, позволяющего интенсифицировать протекание реакций дегидрирования по целевым продуктам за счёт понижения общей энергетики химического превращения и улучшенного теплообмена в высокопористой среде каталитического конвертера.

В настоящей работе для синтеза пористых конвертеров с порами, требуемого размера, в качестве заполнителя в керамическом многокомпонентном материале применялся порошок SiC с размером частиц порядка 100-130 мкм. В качестве связки в исходную шихту вводили ультрадисперсные добавки MgO, SiC и SiO₂. Смешивание исходных порошков осуществляли в шаровой мельнице в течение 2 часов. Затем проводили прессование готовой смеси при давлениях от 75 до 125 МПа с последующим спеканием при максимальной температуре 1350°C в атмосфере воздуха.

Исследование открытой пористости материала производилось методом гидростатического взвешивания, и составила 42%. Размер открытых пор синтезированного образца был определён на основании результатов измерений давлений проскока методом точки пузырька и оказался в области от 4 до 6 мкм.

Исследования эффективности дегидрирования этилбензола в стирол были проведены в реакторе на каталитическом SiC-конвертере в присутствии паров воды, взятых в мольном соотношении H₂O ÷ ЭТБ = 14. Экспериментально установленная оптимальная температура дегидрирования оказалась порядка 600°C. При этой температуре конверсия этилбензола составила 73 %, выход стирола ~ 9 %, селективность по стиrolу ~ 12.3 %, производительность по стиrolу ~ 13 г/(ч·дм³), степень зауглероживаемости катализатора за время эксперимента(бч) не превышала ~ 0.003 мас. %

Синтезированный конвертер имеет следующие основные преимущества:

1. Простая и энергоэффективная одностадийная технология синтеза
2. Отсутствие дорогостоящих каталитических добавок
3. Ультранизкая зауглероживаемость каталитического конвертера, что приводит к радикальному повышению сроков эксплуатации по сравнению с аналогами без необходимости регенерации и замены.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-08-00559 А.

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Д. СЫТЧЕНКО

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Москва, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ Mo-(Zr,Hf)-Si-B, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HIPIMS

Представлены результаты исследования структуры и свойств покрытий на основе дисилицида молибдена, легированного бором, гафнием и цирконием, полученных методом высоко-мощного импульсного магнетронного напыления (HIPIMS– high power impulse magnetron sputtering).

PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV, A.D. SYTCHENKO

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

STUDY OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF OXIDATION- RESISTANT Mo-(Zr,Hf)-Si-B COATINGS DEPOSITED BY HIPIMS TECHNOLOGY

The results of the study of the structure and properties of coatings based on molybdenum disilicide doped with boron, hafnium and zirconium, obtained by high-power impulse magnetron sputtering (HIPIMS) are presented

4. Объёмная керамика и покрытия на основе MoSi_2 и Mo-Si-B нашли применение в различных высокотемпературных узлах авиационной и космической техники, благодаря комплексу уникальных свойств, среди которых можно отметить высокие значения температуры плавления, жаростойкости, прочности и твёрдости. Введение в Mo-Si-B легирующих элементов, таких как Hf и Zr, приводит к заметному повышению механических свойств и предельных рабочих температур. Среди перспективных технологий модификации поверхности одно из лидирующих мест занимает метод высоко-мощного импульсного магнетронного напыления HIPIMS (high power impulse magnetron sputtering), обеспечивающий получение плотных покрытий с экстремальной высокой адгезионной прочностью. Применительно к осаждению жаростойких покрытий MoSi_2 и Mo-Si-B он малоизучен. Целью данной работы является комплексное исследование покрытий Mo-(Zr,Hf)-Si-B, осаждённых методом HIPIMS.

2. Катоды $\text{MoSiB-xZrB}_2/\text{HfB}_2$ ($x=0, 5, 20\%$) были изготовлены методом горячего прессования измельчённых продуктов СВС-реакции. Перед осаждением покрытий производилась предварительная ионная очистка подложек. В качестве подложек использовались Al_2O_3 , Mo, сплавы системы Ni-Cr, Si. Для нанесения покрытий в режиме HIPIMS применялся блок питания

TruPlasma 4002 HutteringrTRUMPF. Частотные и электрические параметры были следующими: задаваемый постоянный ток 1.5 А, постоянное напряжение 1000 В, частота 10, 50 и 200 Гц, длительность импульсов 200 мкс, пиковый ток ~30 А, пиковая мощность 30-40 кВт, время осаждения 40 мин, давление Ar ~0.1 Па. Для сравнения были изготовлены образцы покрытий при магнетронном распылении мишеней на постоянном токе (2А, напряжение 500В) с использованием блока питания AdvancedEnergyPinnacle+ 5x5.

3. Для исследования жаростойкости были проведены отжиги полученных покрытий на воздухе в интервале температур 1000-1700°C. Структура исходных и подвернутых термической обработке покрытий исследовалась с использованием методов РЭМ-ЭДС, РФА, КРС и ОЭСТР. Механические свойства были измерены с помощью наноиндентирования. Была оценена трещиностойкость покрытий, а также исследовано поведение покрытий в условиях трибологического контакта по схемам pin-on-disk и ball-on-plate. Эксперименты по термоциклированию с максимальной температурой нагрева 1000°C проводились с использованием муфельной печи при выдержке единичного цикла 5 мин. Охлаждение образцов проводилось на воздухе и в воде.

Установлено, что при переходе от постоянного тока к режиму HIPIMS наблюдается уплотнение структуры, уменьшение размера кристаллитов основной фазы h-MoSi₂, повышение адгезионной прочности. Твёрдость не связана с режимом распыления и составляет от 20 до 30 ГПа в зависимости от концентраций Si, Hf и Zr. При термоциклировании с быстрым охлаждением все покрытия, осаждённые при постоянном токе полностью разрушались, в то время, как HIPIMS образцы успешно выдерживали испытания. Предельные температуры, при которых покрытия оптимального состава успешно сопротивлялись окислению, составляли $\geq 1700^\circ\text{C}$. Установлено что слой SiO₂, формирующийся на поверхности покрытий в процессе выдержки на воздухе обуславливает высокую жаростойкость покрытий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-19-00117.

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ¹, А.Д. СЫТЧЕНКО¹,
П. ЛОГИНОВ¹, А. ОРЕХОВ², А.В. БОНДАРЕВ³, Е.А. ЛЕВАШОВ¹

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, Россия

³Чешский технический университет, Прага, Чешская Республика

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ, ПРОХОДЯЩИХ В ПЛЁНКАХ ZrMoSiB ПРИ 20-1000°C, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ HRTEM, SAED, FFT, XRD, NHT, FTIR, XPS и RS

В работе проведено исследование термической стабильности жаростойких ионно-плазменных покрытий ZrMoSiB, 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.

PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV¹, A.D. SYTCHENKO¹,
P. LOGINOV¹, A. OREKHOV², A.V. BONDAREV³, E.A. LEVASHOV¹

¹National University of Science and Technology «MI SiS», Moscow, Russia

²Shubnikov Institute of Crystallography of RAS, Moscow, Russia

³Czech Technical University, Prague, Czech Republic

PHASE AND STRUCTURAL CHANGES OCCURRING IN ZrMoSiB FILMS AT 20-1000°C USING HRTEM, SAED, FFT, XRD, NHT, FTIR, XPS, AND RS

The thermal stability of oxidation-resistant ZrMoSiB coatings is studied using high-resolution transmission electron microscopy, including in-situ mode, electron and X-ray diffraction, Raman spectroscopy, infrared and X-ray photoelectron spectroscopy, and nanoindentation. The temperature dependences of the structural parameters and mechanical characteristics of the coatings are established.

Целью данной работы является комплексное исследование термической стабильности структуры и свойств при высокотемпературном нагреве покрытий ZrMoSiB, включая прямое наблюдение в режиме in-situ в колонне электронного микроскопа.

Покрyтия были нанесены методом магнетронного напыления. Керамические функционально-градиентные мишени (ZrB₂+MoSi₂)/Mo были изготовлены

путём горячего прессования композиционного порошка, полученного при измельчении продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза смеси $Zr+Mo+Si+B$. Распыление мишеней проводилось с помощью вакуумной установки типа УВН-2М, оснащённой ионным источником щелевого типа для очистки подложек (ионы Ar^+ , 2-3 кэВ, 60-80 мА) и магнетронными системами. Ток на магнетрон составлял 2 А, напряжение 500 В, использовалась атмосфера Ar (99,9995%), рабочее/остаточное давление в вакуумной камере составляло 0,2/0.005 Па. В качестве подложек использовались пластины из поликристаллического Al_2O_3 . Фольги для исследования были подготовлены с использованием метода FIB и прибора FEIQuanta 200 3D (США). In-situ исследование тонкой структуры и фазового состава покрытий проводилось с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ТЕМ) JEM-2100 JEOL, оборудованного модулем для нагрева образцов фирмы Gatan, в диапазоне температур 20-1000°C. При каждой температуре производилась запись микроизображений, картин электронной дифракции (SAED), а также Фурье-анализ (FTT). Покрытия также подвергались нагреву в стационарных условиях, при тех же температурах и выдержках в условиях вакуума и на воздухе. До и после термической обработки проводились исследования методами рентгенофазового анализа (XRD) на дифрактометре D8 Advance (Bruker, Германия) с использованием $CuK\alpha$ -излучения, Рамановской спектроскопии (RS) на приборе NTEGRA (NT-MDT, SOL) при использовании лазера с длиной волны 633 нм, инфракрасной спектроскопии (FTIR) на приборе BrukerVertex 70v, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (KratosShimadzu, $AlK\alpha$, $h\nu = 1486.6$ эВ), наноиндентирования на приборе NanoHardnessTester (CSMInstruments, Швейцария), оснащенного индентором Берковича. Установлена взаимосвязь между структурными изменениями, особенно выраженными при 800С, и ростом механических характеристик. Изучен и объяснён механизм самоупрочнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект 0718-2020-0034).

Н.А. КОЛЫШКИН^{1,2}, А.А. ВЕЛИГЖАНИН¹

¹Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет), Москва, Россия

AXRDCalc – ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ АНОМАЛЬНОЙ ДИФРАКЦИИ НА PYTHON

Написана программа AXRDCalc на языке python 3 для расчёта интенсивности дифракционных рефлексов на различных кристаллических (порошковых) структурах в зависимости от энергии волны падающего рентгеновского излучения. Программа учитывает влияние локального окружения на спектр интенсивности рефлексов $I_{hkl}(E)$ благодаря использованию экспериментально измеренных спектров поглощения XAFS. В работе используются данные экспериментов, выполненных на Курчатовском Источнике Синхротронного Излучения.

N.A. KOLYSHKIN^{1,2}, A.A. VELIGZHANIN¹

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

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russia

AXRDCalc – THE PROGRAM FOR MODELING X-RAY ANOMALOUS DIFFRACTION FOR PYTHON

The AXRDCalc Python 3 program was written for calculating intensities of diffraction reflections on various crystal structures, depending on the energy of the incident X-ray radiation. The program takes into account the influence of the local structure on the spectrum of diffraction intensities $I_{hkl}(E)$ by using experimentally measured absorption spectra XAFS. Data used in this work were obtained at the Kurchatov Synchrotron Radiation Source.

Аномальная (или резонансная) рентгеновская дифракция – эффект резкого изменения интенсивности дифракционных пиков около края поглощения элементов исследуемого вещества. Часто эту задачу сводят к методу контраста, когда исследователь сравнивает две дифракционные картины: непосредственно на краю поглощения и вдали от него, причём вопрос о точном расчёте интенсивности дифракционных пиков не стоит, только качественное изменение картины. Например, в случае наличия в кристаллической структуре направлений рассеяния, которые из-за особенностей симметрии и атомного состава являются при стандартной дифракции подавленными, метод AXRD часто может усилить соответствующие рефлексы.

Интенсивность дифракционного рефлекса пропорциональна квадрату модуля структурного фактора $|F_{hkl}|^2$, а последний вычисляется по формуле:

$$F_{hkl} = \sum_j f_j e^{2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)}$$

где $f_j = f_j^0(\theta) + f_j^{\prime}(\text{E}) + i f_j^{\prime\prime}(\text{E})$

Поправки $f_j^{\prime}(\text{E})$ и $f_j^{\prime\prime}(\text{E})$ называются аномальными дисперсионными поправками. Будучи зависимыми от энергии падающего излучения, они лучше всего проявляются вблизи края поглощения атома и при этом зачастую имеют весьма сложную форму, по сути напоминающую спектры XAFS.

Как классический AXRD, так и AXRD на нескольких энергетических точках представлены на станциях Курчатовского Источника Синхротронного Излучения. Моделирование AXRD в этой связи является актуальным для определённого круга задач, например, для анализа структур со смешанной заселённостью атомов на определённых кристаллографических позициях. Однако, его количественный расчёт зависит от точности используемых дисперсионных поправок f^{\prime} и $f^{\prime\prime}$, которые, в свою очередь, зависят от локального окружения исследуемого атома.

Установить дисперсионные поправки f^{\prime} и $f^{\prime\prime}$ проще всего с помощью экспериментальных спектров поглощения XAFS, измеренных на том же веществе. Упрощённо можно сказать, что $f^{\prime\prime}(\text{E}) \sim \mu(\text{E})$, а для определения f^{\prime} можно воспользоваться соотношением Крамерса-Кронига [1].

Программа ЭВМ «AXRDCalc» была написана для автоматизации расчёта эффекта аномальной рентгеновской дифракции в кристаллах. Программа принимает на вход экспериментально измеренный спектр коэффициента поглощения в выбранном кристалле от энергии $\mu(\text{E})$, или при необходимости – дисперсионные поправки f^{\prime} и $f^{\prime\prime}$, а также может использовать табличные дисперсионные поправки, рассчитанные Чантлером [2]. AXRDCalc умеет работать с кристаллографическими cif-файлами для загрузки информации о структуре, что упрощает её использование.

Список литературы

1. Kramers H. A. La diffusion de la lumiere par les atomes //Atti Cong. Intern. Fisica (Transactions of Volta Centenary Congress) Como. – 1927. – Т. 2. – С. 545-557.
2. Chantler C. T. Detailed tabulation of atomic form factors, photoelectric absorption and scattering cross section, and mass attenuation coefficients in the vicinity of absorption edges in the soft X-ray (Z= 30–36, Z= 60–89, E= 0.1 keV–10 keV), addressing convergence issues of earlier work //Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 2000. – Т. 29. – №. 4. – С. 597-1056.

В.О. КОПЫТСКИЙ, Е.В. ПЕТРОВ, С.Н. БУРАВОВА

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им.А.Г.Мержанова РАН, Черноголовка, Россия*

ИЗУЧЕНИЕ ОТКОЛЬНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В БРОНЗЕ ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

В работе рассмотрены особенности образования откольной повреждаемости после ударно-волнового нагружения. Изучено возникновение иглоподобного откольного разрушения при кавитационной эрозии, которая снижает срок эксплуатации изделий.

V.O. KOPYTSKIY, E.V. PETROV, S.N. BURAVOVA

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy
of Sciences, Chernogolovka, Russia*

INVESTIGATION OF THE SPALL DAMAGE IN BRONZE AFTER SHOCK-WAVE LOADING

The features of the spall damage formation after shock-wave loading are observed. The occurrence of needle-like spall fracture during cavitation erosion, which reduces the service life of materials, is studied.

Исследования сопротивления высокоскоростному деформированию и разрушению материалов из бронзы определяется потребностью в экспериментальных сведениях об ее прочностных и физико-механических свойствах. Это необходимо для поиска новых способов модификации и восстановления свойств материалов после ударно-волнового воздействия. Бронзовые сплавы используются для изготовления деталей машин и приборов, которые подвержены трению в подвижных узлах механизмов. Данные сплавы обладают высокой устойчивостью к механическому истиранию и высокой коррозионной стойкостью. Важным применением бронзы является изготовление гребных винтов в судостроении. Гребные винты в процессе эксплуатации в первую очередь подвергаются откольной повреждаемости.

Откольная повреждаемость является специфическим видом разрушения материалов при ударно-волновом нагружении. Для изучения закономерностей динамического разрушения материалов в экспериментах зачастую проводят испытания образцов на откольную прочность [1]. Преимуществом данного метода является то, что схема подобного рода экспериментов позволяет определить импульс напряжений, который приводит к разрушению. В результате взаимодействия падающей и отраженной волн вблизи свободной поверхности образца реализуется явление откола. При этом, в определенных местах материала в некоторые моменты времени суммарное напряжение может

стать растягивающим, и возможен отрыв слоя материала, так как прочность материала на растяжение значительно ниже, чем на сжатие [2].

Подобные явления приводят конструкционные элементы морских судов в нерабочее состояние. Так как, при схлопывании кавитационных пузырьков в воде возникает поток сферических ударных волн. Данный поток вызывает образование глубоких узких кратеров на поверхности материала. На конечной стадии длительного воздействия возникает иглоподобное откольное разрушение. Тем самым, кавитационная эрозия значительно снижает срок эксплуатации гребных винтов судов.

Объектами исследования являются бронзовые сплавы марок БрАЖ9-4 и БрАМЦ9-2, которые обладают высокими эксплуатационными свойствами в морской воде (высокая прочность и стойкость к коррозии), и являются подходящими для изготовления деталей, работающих в условиях сильной эрозии. В экспериментальных исследованиях будут использоваться две схемы ударно-волнового нагружения: метание пластины-ударника и обжатие скользящей детонационной волной, позволяющие варьировать интенсивность нагружения.

Изучение особенностей образования откольной повреждаемости в бронзах после ударно-волнового нагружения, позволит определить начальную стадию разрушения, что необходимо для поиска новых способов модификации бронзовых сплавов для продления срока службы изделий.

Список литературы

3. Михайлова Н.В., Петров Ю.В. // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23, №3. С. 15-21.
4. Хомская И.В., Разоренов С.В., Гаркушин Г.В., Шорохов Е.В., Абдуллина Д.Н. // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. №4. С. 435-442.

В.О. КОПЫТСКИЙ, Е.В. ПЕТРОВ

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им.А.Г.Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯСТАЛИ 09Г2С ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГОСОУДАРЕНИЯ С ПОРОШКАМИ W, TiC, Ni

Проведены исследования поверхностного слоя стали 09Г2С после высокоскоростного соударения с порошками: вольфрама, карбид титана и никеля. Показано, что использование порошков с разной плотностью и размерами частиц приводит к существенному отличию образования покрытия на поверхности преграды.

V.O. KOPYTSKIY, E.V. PETROV

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of
Sciences, Chernogolovka, Russia*

INVESTIGATION OF THE 09G2S STEEL SURFACE LAYER AFTER HIGH-SPEED COLLISION WITH W, TiC, Ni POWDERS

Researches of the steel 09G2S surface layer after high-speed collision with powders of tungsten, titanium carbide and nickel, are carried out. It is shown that the use of powders with different densities and particle sizes leads to a significant difference in coating formation on the barrier surface.

Обработка поверхности металлических преград потоком частиц, разогнанных энергией взрыва, представляет особый интерес. При соударении частиц порошков размером от 5 до 100 мкм со скоростью 1000-3000 м/с материал частиц может проникать в металлические преграды на глубину от 100 до 1000 своих исходных размеров [1]. Экспериментально показано, что изменения структуры в преграде складываются из воздействия ударных волн и частиц порошков поверхностью преграды, которые способны улучшить физико-механические свойства, как поверхностного слоя, так и всего объема обрабатываемой преграды [2].

Целью настоящей работы является исследование поверхностного слоя стали 09Г2С после высокоскоростного соударения с частицами порошков: вольфрама, карбид титана и никеля.

При проведении экспериментов в качестве преграды был использован цилиндрический образец из конструкционной стали марки 09Г2С диаметром 24 и высотой 30 мм. В качестве порошков использовались: вольфрам ($d = 10 \div 16$ мкм), карбид титана ($d = 40 \div 60$ мкм) и никель ($d = 6 \div 16$ мкм). При детонации ударная волна и продукты детонации взрывчатого вещества разгоняли порошок и вместе с ним воздействовали на образец.

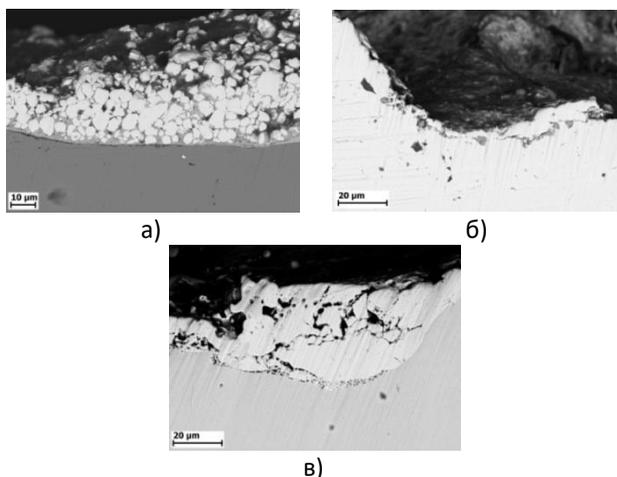


Рис. 1. Поверхностный слой стали 09Г2С после соударения с частицами: а) W; б) TiC; в) Ni.

При соударении высокоскоростного потока частиц с преградой наибольшая часть частиц остается в приповерхностной зоне, формируя волнообразное, неравномерное по толщине покрытие от 10 до 50 мкм по ширине образцов (рисунок 1). В покрытии, полученном после соударения с порошком вольфрама (рисунок 1а), наблюдаются нерасплавленные частицы вольфрама, размер которых меньше по сравнению с исходными частицами. На двух других покрытиях (рисунок 1б, 1в) сохранные частицы не наблюдаются, что может быть связано с размером и температурой плавления частиц порошков при взаимодействии с продуктами детонации.

Полученные результаты позволяют заключить, что использование порошков с разной плотностью и размерами частиц приводит к существенному отличию образования покрытия на поверхности преграды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00553 а.

Список литературы

1. Ушеренко С.М. // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. № 3. С. 183-198.
2. Кирсанов Р.Г., Петров Е.В., Кривченко А.Л. // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 6, С. 43-46.

А.М. КОХХАРОВ, С.А. БАХРАМОВ, У.К. МАХМАНОВ,
Ш.А. ЭСАНОВ, Б.А. АСЛАНОВ, З. БЕКМУРОДОВ,
Б.А. СИНДАРОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова
АН РВз., Ташкент, Узбекистан*

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОТРУБОК ФУЛЛЕРЕНА C₆₀ В ОБЪЕМЕ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ РАСТВОРА

Исследованы особенности зарождения и дальнейшего роста нано- и микроразмерных трубок на основе фуллерена C₆₀ гексагональной формы при испарении изолированной капли раствора C₆₀ в смеси растворителей «этилбензол-изопропиловый спирт», расположенной на плоской поверхности кремниевой подложки. Определены морфологические и размерные характеристики полученных нанотрубок фуллерена C₆₀ на поверхности подложки.

A.M. KOKHKHAROV, S.A. BAKHRAMOV,
U.K. MAKHMANOV, SH.A. ESANOV, B.A. ASLANOV,
Z. BEKMURODOV, B.A. SINDAROV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov Academy of Sciences
of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan*

PRODUCTION OF FULLERENE C₆₀ NANOTUBES IN THE VOLUME OF EVAPORATING DROPLETS OF SOLUTION

The features of the nucleation and further growth of nano- and micro-sized tubes based on C₆₀ fullerene with a hexagonal shape, obtained by evaporation of an isolated drop of a solution of C₆₀ in «ethylbenzene-isopropyl alcohol» solvent located on a smooth surface of a silicon substrate, were studied. The morphological and dimensional characteristics of the obtained C₆₀-based nanotubes were determined.

В последние годы растущий спрос на наноструктурированные материалы для использования в различных областях нанотехнологии возродил интерес к изучению синтеза новых наноматериалов из молекул фуллеренов C₆₀ и C₇₀. Сферическая углеродная молекула C₆₀ (с высокой симметрией I_h) имеет сферическую оболочку толщиной ~0.1 нм, радиус молекулы составляет ~0.36 нм [1]. Фуллерен C₆₀ представляет собой полупроводник с шириной запрещенной зоны ~1.85 эВ.

Целью данной работы является исследование особенностей зарождения и установление физических механизмов роста нанотрубок на основе фуллерена C₆₀ в объёме испаряющихся капель раствора. В работе использованы порошки фуллерена C₆₀ (SES Research, США), а также органические растворители –

этилбензол (C_8H_{10}) марки «ч.д.а.» и изопропиловый спирт (C_3H_8O) марки «х.ч.» от Sigma-Aldrich (США).

Морфологические и размерные характеристики полученных нанотрубок фуллерена C_{60} изучены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В наших экспериментах большую роль в формировании нанотрубок на основе фуллерена C_{60} играет градиент температуры, который возникает при резком охлаждении поверхностного и приповерхностного слоев капли фуллерена C_{60} в результате интенсивного испарения органических растворителей (этилбензол и изопропиловый спирт в объёмной фракции 0.85:0.15, соответственно). На рис. 1 приведен СЭМ-снимок нанотрубок фуллерена C_{60} , синтезированных в процессе теплового испарения органических растворителей из объёма изолированной капли раствора C_{60} , находящейся на гладкой поверхности горизонтально расположенной кремниевой подложки.

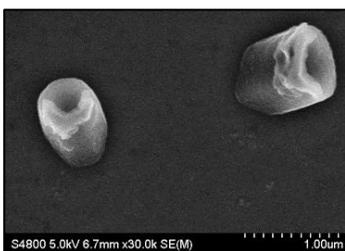


Рис. 1. СЭМ-снимок нанотрубок фуллерена C_{60} , синтезированных в объеме одной испаряющейся капли раствора фуллерена на поверхности кремниевой подложки.

Видно, что наружный и внутренний диаметры нанотрубок составляют ~ 600 нм и ~ 412 нм соответственно. Средняя длина полученных нанотрубок составляет ~ 780 нм. На одном конце полученные нанотрубки фуллерена C_{60} закрыты. Нанотрубки C_{60} могут хорошо поглощать водные и спиртовые растворы различных наночастиц. Это открывает возможность потенциального использования нанотрубок фуллерена C_{60} в медицине для точечной доставки в клетки различных лекарственных препаратов, в энергетике как контейнер наножидкостей, и в электромеханике в качестве насыщающихся поглотителей энергии удара.

Список литературы

4. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Bakhrarov S.A., Ertis D. // Lithuanian Journal of Physics. 2020. Vol. 60. No. 3, P. 194–204. DOI:10.3952/physics.v60i3.4306

К.А. КУПЦОВ, А.Н. ШЕВЕЙКО, Д.А. СИДОРЕНКО,
Д.В. ШТАНСКИЙ

*Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС», Москва,
Россия*

ГИБРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ TiC/C НА ТИТАНЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ТРИБОКОРРОЗИИ

Разработана гибридная технология нанесения покрытий TiC/C на поверхность титановых изделий, сочетающая в себе вакуумное электроискровое легирование и дуговое испарение, для их защиты от трибокоррозии при эксплуатации в условиях морской воды и солевого тумана. Варьирование режимов позволяет управлять структурой и составом, создавая различные виды покрытий: TiC/Ti, TiC, TiC/C. Полученные покрытия обладали высокой коррозионной и износостойкостью в искусственной морской воде.

K.A. KUPTSOV, A.N. SHEVEYKO, D.A. SIDORENKO,
D.V. SHTANSKY

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

HYBRID TECHNOLOGY OF TiC/C COATINGS FORMATION ON TITANIUM TO PROTECT FROM TRIBOCORROSION

A hybrid technology, which combines vacuum electrospark alloying and arc evaporation, for the deposition of TiC/C coatings on surface of titanium parts has been developed to protect them from tribocorrosion when used in seawater and salt spray. Varying deposition regimes helps to control the structure and composition, creating various types of coatings: TiC/Ti, TiC, TiC/C. The resulting coatings demonstrated high corrosion and wear resistance in artificial seawater.

Детали и узлы прибрежной и морской инфраструктуры, эксплуатирующиеся в условиях трения, кавитационного или абразивного износа, подвержены синергетическому воздействию износа и коррозии, которые усиливают друг друга и приводят к преждевременному выходу оборудования из строя. Одним из решений данной проблемы является нанесение защитных покрытий, обладающих высокими механическими и коррозионными свойствами. Покрытия получают различными методами: электрохимические методы (гальваника), PVD, CVD, плазменное напыление и т.д. Существенным недостатком большинства методов является низкая адгезионная прочность. Электроискровое легирование (ЭИЛ), за счёт переплава материала электрода и подложки, позволяет получать покрытия с очень высокой адгезионной прочностью. Проведение процесса ЭИЛ в вакууме обеспечивает отсутствие загрязнений (оксидов) в покрытиях, а также

позволяет комбинировать этот метод с другими вакуумными технологиями, что приводит к большей гибкости при выборе архитектуры покрытий.

В данной работе были получены покрытия в системе TiC/C на титановых подложках с использованием гибридной технологии, сочетающей в себе ЭИЛ в вакууме и дуговое испарение. Варьирование режимов нанесения позволило управлять структурой покрытий. Были получены покрытия TiC/Ti (дендритные зёрна TiC в титановой матрице), TiC (плотное покрытие карбида титана с аксиальными зёрнами), а также TiC/C (покрытия с верхним слоем графита с нанокристаллитами TiC нижним слоем TiC/Ti).

Структура, элементный и фазовый состав покрытий были изучены комбинацией аналитических методов: РФА, СЭМ и ПЭМ, рамановская спектроскопия, ЭДС, а также РФЭС. Оценены механические и трибологические свойства покрытий. Проведены коррозионные и трибокоррозионные эксперименты. Для проведения трибокоррозионных испытаний была изготовлена специальная вращающаяся трёхэлектродная ячейка, установленная на трибометр. Это позволяло одновременно с измерением коэффициента трения фиксировать значения электрохимического потенциала покрытия в условиях трения в искусственной морской воде.

Покрытия TiC/С обладали высокой износостойкостью (низкие значения приведённого износа) и низким коэффициентом трения как в испытаниях на воздухе, так и в морской воде по сравнению с титаном. Помимо этого, покрытия с верхним дуговым слоем графита, инертного материала в морской воде, продемонстрировали превосходную коррозионную стойкость.

Работа была выполнена в рамках проекта РФФ №20-79-10104 «Разработка твердых гидрофобных покрытий, обладающих противообрастающим, антиледовым, и самозалечивающим эффектом, предназначенных для защиты объектов морской и прибрежной инфраструктуры от трибокоррозионного, абразивного и кавитационного износа».

А.Е. КРЮКОВА^{1,2}, П.В. КОНАРЕВ^{1,2}, В.В. ВОЛКОВ¹

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

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ ВЫТЯНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ

Проведена оценка границ устойчивости восстановления решения задачи определения объемных распределений частиц по размерам от полидисперсной системы вытянутых цилиндрических частиц по данным малоуглового рассеяния. Показано, что диапазон области стартовых значений параметров, с которых возможно восстановление правильного решения становится шире при наличии пуассоновского шума и сужается при добавлении гауссовского шума.

A.E. KRYUKOVA^{1,2}, P.V. KONAREV^{1,2}, V.V. VOLKOV¹

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

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

SOLUTION STABILITY OF POLYDISPERSE SYSTEM OF ELONGATED CYLINDRICAL PARTICLES USING SMALL-ANGLE SCATTERING DATA

The stability limits of the solution for the problem of restoring volume size distributions of particles from the polydisperse system of elongated cylindrical particles using small-angle scattering data were evaluated. It is shown that the range of starting parameter values, from which the recovery of the correct solution is still possible, becomes wider in the presence of Poisson noise and it is narrowed after addition of Gaussian noise.

Метод малоуглового рассеяния (МУР) является универсальным структурным методом для анализа полидисперсных систем в наноразмерном диапазоне.

Ранее нами рассматривалась возможность восстановления функции распределения частиц по размерам для данных МУР от полидисперсных сферических частиц [1,2] с помощью программы MIXTURE [3] (из пакета программ ATSAS [4]), где в алгоритме минимизации используется градиентный метод переменной метрики в варианте Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шанно (BFGS) с простыми ограничениями на параметры [5].

В данной работе мы расширили анализ устойчивости решений данной задачи на полидисперсные системы вытянутых цилиндрических частиц. В результате анализа были построены контурные графики устойчивости при варьировании шести пар параметров (радиусов цилиндрических частиц, их полидисперсностей

и объемных долей) для теоретической модельной системы, состоящих из двух типов плоских дисков.

Параметры, описывающие систему, поочередно изменялись в широком диапазоне при фиксированных значениях остальных параметров, и при этом исследовалась возможность восстановления правильного решения программой MIXTURE. Кроме того, к наборам теоретических данных добавлялся шум с относительным уровнем 25%, отвечающий распределениям Гаусса и Пуассона.

По результатам моделирования были получены оценки диапазона для параметров, при которых восстановление возможно (для теоретических кривых без шума, и с добавлением 25% гауссовского и пуассоновского шумов). Показано, что диапазон области стартовых значений параметров, с которых возможно восстановление правильного решения становится шире при наличии пуассоновского шума и сужается при добавлении гауссовского шума. Полученные результаты дополняют информацию об устойчивости решений обратной задачи восстановления распределения частиц по размерам для полидисперсных систем различной природы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, а также при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-32-90190 Аспиранты).

Список литературы

1. Kryukova A.E., Konarev P.V., Volkov V.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017, Vol. 941, P. 012069
2. Kryukova A.E., Konarev P.V., Volkov V.V. // Cryst. Reports. 2018, Vol. 63, № 1, P. 26-31.
3. Konarev P.V., Volkov V.V. et al. // J. Appl. Cryst. 2003, Vol. 36, P. 1277-1282.
4. Manalastas-Cantos K., Konarev P.V. et al. // J. Appl. Cryst.. 2021, Vol. 54, P. 343-355.
5. Gill P.E., Murray W., Wright M.H., Practical Optimization, Academic Press, London, 1981.

М.Ш. КУРБАНОВ, М. ЭРНАЗАРОВ, С.А. ТУЛАГАНОВ,
Х.К. РАШИДОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз,
Ташкент, Узбекистан*

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ФТОРИДНЫМ МЕТОДОМ

Исследованы особенности синтеза аморфного диоксида кремния (SiO_2) из различного кремнийсодержащего сырья с использованием фторида аммония. Показано, что размеры синтезированных наночастиц SiO_2 зависят от концентрации гексафторсиликата аммония и температуры, при которой происходит гидролизация. Установлено, что распределение синтезируемых наночастиц SiO_2 по размерам можно регулировать фракционным составом исходного материала.

M.SH. KURBANOV, M. ERNAZAROV, S.A. TULAGANOV,
KH.K. RASHIDOV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov Academy of Sciences,
Tashkent, Uzbekistan*

FEATURES OF SYNTHESIS OF AMORPHOUS SILICON DIOXIDE NANOPARTICLES BY THE FLUORIDE METHOD

The features of the synthesis of amorphous silicon dioxide (SiO_2) from various silicon-containing raw materials using ammonium fluoride have been investigated. It is shown that the sizes of the synthesized SiO_2 nanoparticles depend on the concentration of ammonium hexafluorosilicate and the temperature at which hydrolysis occurs. It was found that the size distribution of synthesized SiO_2 nanoparticles can be controlled by the fractional composition of the starting material.

Высокодисперсный аморфный диоксид кремния (SiO_2), благодаря развитой поверхности частиц, их химической нейтральности, низкой теплопроводности и диэлектрической проницаемости находит широкое применение в различных отраслях промышленности: химической, фармацевтической, шинной, пищевой, лакокрасочной и т.д. Добавка нанопорошков SiO_2 позволяет улучшать и придавать новые свойства различным материалам.

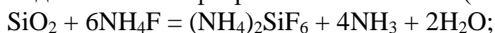
Аморфный SiO_2 с высокой удельной поверхностью в природе не встречается, поэтому его можно получить только технологическим способом. При этом, способ получения нанопорошков SiO_2 существенно влияет на свойства синтезируемых частиц, дисперсность, распределение наночастиц по размерам и т.д.

Целью данной работы является разработка технологии получения нанопорошков аморфного диоксида кремния заданных свойств.

Для этой цели использованы различные исходные материалы: отвальные шлаки медеплавильного производства Алмалыкского ГМК, высокодисперсные отходы кремниевого производства – микрокремнезем и кварцевые пески.

Для синтеза наночастиц аморфного SiO₂ использовался фторирующий реагент – кристаллический фторид аммония (NH₄F) или гидрофторид аммония (NH₄HF₂). Фторирование осуществлялось в лабораторной установке специальной конструкции с реактором из никелевого сплава. Для разделения и сбора летучих продуктов применялся конденсатор, изготовленный из нержавеющей стали. Поглощение газообразного аммиака осуществлялось в сосуде с водой, а регенерация NH₄F (или NH₄HF₂) - в лабораторном выпаривателе.

Технологический процесс получения наночастиц SiO₂ включает спекание исходного материала с фторидом аммония при температурах 90-160°C до образования порошкообразного пека, затем полученные смеси фтороаммонийных соединений Si обрабатываются при температурах 320-400°C до сублимационного отделения гексафторсиликата аммония (NH₄)₂SiF₆:



Для выделения порошков диоксида кремния ведется гидролизация (NH₄)₂SiF₆ под действием аммиачной воды (NH₄OH).

Показано, что чистота получаемых порошков по SiO₂ составляет не менее 99,97 % масс., а размеры наночастиц зависят от концентрации гексафторсиликата аммония в растворе и температуры, при которой происходит гидролизация.

Экспериментально установлено, что распределение синтезированных наночастиц SiO₂ по размерам можно регулировать фракционным составом исходного материала. А сам диапазон распределения полученных наночастиц по размерам достаточно широкий- от 30 nm и до 520 nm. При этом, основная часть частиц (90 %) имеет диаметр 45-250 nm.

М.Ш. КУРБАНОВ, Б.М. АБДУРАХМАНОВ, У.М.НУРАЛИЕВ,
У.Н. РУЗИЕВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз,
Ташкент, Узбекистан*

СИНТЕЗ НАНОПОРОШКОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА

Карботермическим восстановлением микрокремнезема, представляющего собой высокодисперсные техногенные отходы производства кремния и его сплавов, синтезированы микро и нанопорошки карбида кремния SiC. Показано, что этим путем могут быть синтезированы 4H, 6H и 3C поли типы SiC. Установлено, что размер синтезированных частиц SiC зависит от размеров частиц используемого углеродистого восстановителя.

M.SH. KURBANOV, B.M. ABDURAKHMANOV,
U.M. NURALYEV, U.N. RUZIEV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov Academy of Sciences,
Tashkent, Uzbekistan*

SYNTHESIS OF SILICON CARBIDE NANO POWDERS WITH THE USE OF SILICA FINE

Micro and nanopowders of silicon carbide SiC were synthesized by carbothermal reduction of microsilica, which is a highly dispersed technogenic waste from the production of silicon and its alloys. It is shown that 4H, 6H and 3C SiC polytypes can be synthesized in this way. It has been found that the size of the solid SiC particles depends on the size of the solid reducing agent used.

Карбид кремния SiC обладает широким спектром полезных физико-химических свойств. Благодаря этому он имеет широкий спектр применения в различных областях науки и отраслях промышленности.

В этой связи первоочередной интерес представляют работы, направленные на развитие технологий получения SiC, особенно, в части синтеза микро- и наноразмерных порошков этого материала.

Микрокремнезем (МКЗ) является побочным продуктом производства металлического кремния и ферросилиция. Благодаря высокой дисперсности, соответственно, большой удельной поверхности частиц, и высокому содержанию в них SiO₂, составляющему 95-97 масс. %, МКЗ может быть использован для синтеза порошков SiC.

В данной работе приведены результаты исследований по использованию МКЗ для синтеза микро- и нано порошков карбида кремния с использованием двух видов углеродистого восстановителя.

В экспериментах было использовано два типа углеродистого восстановителя: 1) нефтяной кокс с содержанием углерода $C \geq 90,0\%$, намеренно измельченный до размеров частиц 0,5-1,0 мм. 2) технический углерод марки К-354с размерами частиц 10-200 мкм и содержанием $C \geq 95,0\%$.

Для синтеза карбида кремния использовали печь сопротивления, а для изучения фазового состава SiC - рентгеновский дифрактометр XRD-6100, а для изучения морфологии и размеров частиц, их распределение по размерам - сканирующий электронный микроскоп и лазерный анализатор NanoSightLM10 с предварительным диспергированием порошка ультразвуковыми волнами.

На основе рентгенодифракционного анализа показано, что из МКЗ могут быть синтезированы порошки SiC, соответствующие кубическому 3С и гексагональному 4Н и 6Н политипов карбида кремния. Положение рентгеновских пиков SiC, синтезированного из МКЗ, и наличие графитового пика в 26,341, согласуется с данными других авторов [1, 2].

Частицы порошков SiC имеют неправильную форму, близкую к «осколочной» с гладкой поверхностью, на которой практически отсутствуют проявления «шершавости» (развитости поверхности) частиц.

Установлена роль «размерного эффекта», согласно которому распределение синтезированных частиц по размерам зависит от размеров частиц использованного углеродистого восстановителя:

при использовании нефтяного кокса с исходными размерами частиц 0,5-1,0 мм, минимальный размер синтезированных частиц SiC составляет ~30 нм, а наибольшая концентрация частиц - в диапазоне 100-200 нм;

при использовании технического углерода, частицы которого имеют размеры 10-200 мкм, наблюдается заметный сдвиг размеров частиц SiC, наоборот, в большую сторону, то есть минимальный размер частиц SiC составляет ~80-90 нм, а наибольшая концентрация - в диапазоне 150-350 нм.

Таким образом, размер частиц порошков SiC и их гранулометрический состав зависит от размеров частиц применяемых углеродистых восстановителей.

Список литературы

1. J. Aguilar, J. Rodriguez, M. Hinojosa. JMPEE, 2016, 36, 3, 169-177.
2. A.L. Ortiz and et.al. Materials Letters, 2001, 49, 137-145.

М.Ш. КУРБАНОВ, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз,
Ташкент, Узбекистан*

ТЕХНОЛОГИЯ БРИКЕТИРОВАНИЯ И НАНОФРАКТАЛЫ

Проблемы технологии брикетирования рассмотрены в ракурсе одного из аспектов «complexity» - нанофракталов. Осуществлено их адекватное применение для получения технического кремния с использованием брикетированной шихты.

M.SH. KURBANOV, B.L. OKSENGENDLER

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov Academy of Sciences,
Tashkent, Uzbekistan*

BRIQUETTING TECHNOLOGY AND NANOFRACTALS

The problems of briquetting technology are considered from the perspective of one of the aspects of "complexity" - nanofractals. Their adequate application has been carried out for the production of technical silicon using a briquetted charge.

Современное материаловедение и технологии, отражая тенденции физики конденсированного состояния в 21 веке, все более проникается идеями «complexity», базирующимися на комбинированной нелинейности свойств объектов и условий их функционирования. В данной работе идеи «complexity» применяются к проблемам технологии брикетирования мелкодисперсных сырьевых материалов (ранее использовавшиеся лишь в ракурсе большой внутренней площади пористых объектов) на основе комбинации «нано» и «фрактальности», приводящей к новым нанофрактальным процессам физики и химии поверхности [1].

Основная идея нанофрактальности состоит в следующем: реакционная поверхность поры сильно зависит от ее размера R (увеличиваясь для наномасштабов) и от взаимонаправленности ближайших орбиталей (от угла θ между ними). В свою очередь R и θ являются функциями фрактальных распределений как по размеру пор $f(R)$, так и по длине периметра сечений пор с равными площадями - $\varphi(L)$.

Согласно концепции Коулсона, реакционная способность орбитали характеризуется индексом свободной валентности (ИСВ), которая в нашем случае определяется как:

$$\text{ИСВ} = [\sigma(-\theta) + \sigma(x)] \cdot [1 - \exp(-\text{const } \rho(l \theta |))],$$

где $\rho(|\theta|)$ зависит от функции фрактальных распределений, $\sigma(x)$ – функция Хевисайда, ρ – размер орбитали. Это даёт: при $\theta < 0$ реакционная способность понижена по сравнению с плоской поверхностью ($\theta = 0$), а при $\theta > 0$ она повышена.

Механизмы физико-химических процессов указанных типов поверхностей описываются нетривиальной теорией нанофрактальности [1].

Применение ее к технологии брикетирования выражается в следующем:

1. Пора реализует «фактор клетки», увеличивая вероятность столкновения реагентов.

2. Подбор функций $f(R)$ и $\varphi(L)$ позволяет оптимизировать реакционную способность реагентов в поре с внутренними областями ингибиторного ($\theta < 0$) и активаторного ($\theta > 0$) типов.

3. Реализация макродиффузии реагентов сквозь брикеты весьма переменна при использовании требуемой концентрации пассиваторных центров ($\theta \ll 0$) и управлении порогом перколяции (через фрактальную размерность функции $f(R)$).

Построенные модели, реализующие позиции 1, 2 и 3, были опробованы на технологии брикетирования мелкодисперсного сырья для выплавки кремния и его сплавов [2]. В частности, эти модели позволили адекватно описать целый ряд технически важных брутто характеристик, таких как зависимость удельного расхода электроэнергии от общей пористости всего брикета.

Список литературы

1. V.L. Oksengendler, K.B. Ashurov, S.E. Maksimov et.al., Nanofractals: concepts and applications, Chapter 1 in “Horizons in World Physics”, V. 298, 2019, Nova Sci. Publ. Inc.
2. М.Ш. Курбанов. Совершенствование технологии выплавки технического кремния и кремнистых сплавов. Автореферат докторской диссертации, 2018, Ташкент.

Р.Т. КУРБАНОВ, З.А ИСАХАНОВ, З.А. МУХТАРОВ,
Р.М. ЁРКУЛОВ, А.А. АХМЕДОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз,
Ташкент, Узбекистан*

ОБРАЗОВАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В работе исследована эмиссия кластерных ионов стехиометрического состава $A_nB_m^+$ ($n+m \leq 12$) при ионной бомбардировке границ раздела механически состыкованных двух разнородных металлов A и B . Показана, что наряду с моноатомными кластерными ионами A_n^+ и B_m^+ ($n \leq 15$), также с большой вероятностью могут образоваться гетероатомные кластерные ионы типа $A_nB_m^+$, состоящие из комбинации отдельных атомов, которые до бомбардировки находились на расстоянии, многократно превышающей ($\lambda \gg 1 \mu\text{м}$) постоянной кристаллической решетки.

R.T. KURBANOV, Z.A. ISAKHANOV, Z.E. MUKHTAROV,
R.M. YORKULOV, A.A. AXMEDOV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov Academy of
Sciences, Tashkent, Uzbekistan*

FORMATION OF CHARGED NANOPARTICLES UNDER ION BOMBARDMENT OF BOUNDARY OF TWO DIFFERENT METALS

The emission of cluster ions of stoichiometric composition $A_nB_m^+$ ($n+m \leq 12$) has been studied under ion bombardment of boundary between two different mechanically joined metals A and B . It has been shown that, along with monoatomic cluster ions A_n^+ and B_m^+ ($n \leq 15$), the heteroatomic cluster ions of the $A_nB_m^+$ type can be also formed with the high probability, these heteroatomic atoms consisting of a combination of individual atoms that before bombardment were at a distance many times greater ($\lambda \gg 1 \mu\text{m}$) than the crystal lattice constant.

В настоящей работе исследовалось образование гетероатомных кластеров типа $A_nB_m^+$ под действием ионной бомбардировки границ раздела механически состыкованных двух металлических мишеней из переходных металлов. Исследование этой задачи имеет практическую ценность, поскольку оно, с одной стороны, позволяет сделать вывод о справедливости использования гетероатомных наночастиц в аналитических целях, с другой, позволяет изучать возможность получения гетероатомных наночастиц вида $A_nB_m^+$ без предварительного изготовления сплавов и соединений. Эксперименты были выполнены на вторично-ионном масс-спектрометре с двойной фокусировкой. Первичные ионы генерировались ионным источником типа дуоплазматрон. Энергия первичных ионов составляла 7-10 кэВ. Первичные ионы

бомбардировали мишени под углом 50^0 , относительно нормали к мишени. Исследование проводили в вакууме при остаточном давлении $\sim 10^{-8}$ Тор.

Для изготовления мишеней применялись пластинки образцов, обогащенных одним из изотопов элементов: ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{63}Cu и ^{65}Cu . Процент изотопного обогащения каждой пластинки составляет более 99%. Мишени тщательно шлифовались, полировались и состыковывались под микроскопом так, чтобы расстояние между ними составляло не более 1-2 мкм. Границы раздела бомбардировались ионами Kr^+ с энергией 8 кэВ при плотностях тока на мишень $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ А/см². Диаметр пучка был равен ~ 1 мм, что существенно больше, чем расстояние между мишенями в области раздела. В масс-спектрах ВИИЭ области раздела изотопов разнородных металлов наряду с пиками вида A_n^+ или B_m^+ , состоящими из атомов одного сорта изотопа, наблюдаются пики гетероатомных наночастиц вида $A_nB_m^+$, которые состоят из атомов образцов, составляющих границы раздела. В общем случае максимальное количество атомов в наночастице типа $A_nB_m^+$ для всех видов мишеней обнаруженных в масс-спектрах не превышал ($n + m \leq 12$).

Согласно существующим моделям, кластерные ионы образуются из атомов, находящихся в соседних узлах поверхности твердого тела. Атомы, из которых образуются интерметаллидные наночастицы, в условиях нашего эксперимента до бомбардировки отстоят на расстояния, значительно превышающие постоянную решетки. Можно предположить, что при бомбардировке границ раздела двух мишеней в процессе распыления происходит взаимное напыление и интенсивное перемешивание разнородных атомов. Таким образом, эксперименты показывают, что заряженные наночастицы при ионной бомбардировке могут образоваться с большой вероятностью из атомов, которые до бомбардировки не были соседними в решетке, что свидетельствуют в пользу рекомбинационной природы механизма образования кластеров [1]. Отметим также, что метод ионной бомбардировки границы раздела разнородных веществ, можно рассматривать как способ синтеза гетероатомных наночастиц типа A_nB_m , с заданными свойствами.

Список литературы

2. Н.Х. Джемилев. «Механизм образования молекулярных кластеров при ионном распылении», *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, №8, с. 28-34. (2012).

М.Н. ЛАРИЧЕВ, Н.С. ШАЙТУРА, В.В. АРТЕМОВ

*Федеральный исследовательский центр Химической Физики им. Н.Н.Семёнова РАН,
Москва, Россия*

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО КЛАССА 2D НАНООБЪЕКТОВ - ОБОЛОЧЕК ПУЗЫРЕЙ С НАНОРАЗМЕРНОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В настоящей работе предлагается использовать впервые полученные алюминиевые пузыри с наноразмерной толщиной стенки для нужд нанoeлектроники. Стенка алюминиевых пузырей представляет собой «сэндвич»-структуру: наноплёнка алюминия покрыта с обеих сторон ультратонкой (толщиной несколько нм) плёнкой оксида алюминия. Такие пузыри образуются при нагревании до 750°C частиц с алюминиевым ядром, покрытых оболочкой гидроксида алюминия толщиной до 300 нм. Характерной особенностью пузырей является наноразмерная толщина стенки (15-30 нм) и ее газонепроницаемость, вытекающая из метода изготовления.

M.N. LARICHEV, N.S. SHAITURA, V.V. ARTEMOV

Institute of Chemical Physics named Semenov RAS, Moscow, Russia

APPLICATION OF A NEW CLASS OF 2D NANO-OBJECTS - BUBBLE SHELLS WITH A NANOSIZED WALL THICKNESS FOR MICROELECTRONIC PURPOSES

In this paper, it is proposed to use for the first time obtained aluminum bubbles with a nanoscale wall thickness for the needs of nanoelectronics. The wall of aluminum bubbles is a "sandwich" structure: an aluminum nanofilm is covered with an ultrathin aluminum oxide film several nm thick at both sides. Such bubbles are formed by heating «core-shell» particles (Al/Al₂O₃) up to 750°C. A characteristic feature of bubbles is their ultra-thin wall thickness and gas tightness, which follows from the method of their manufacture.

В настоящее время разработано множество способов создания нанопокровтий на поверхности твердых тел. Однако, эти способы не решают проблему получения ультратонких фольг, в частности, алюминиевых. Получаемые методом прокатки фольги имеют толщину до 5 мкм. Ранее нами было обнаружено явление образования полых тонкостенных алюминиевых пузырей [1] (рисунок 1). Диаметр таких пузырей составляет несколько мкм, а толщина оболочки несколько десятков (10-30)нм. При подобных параметрах пузыря, а именно при отношении толщины оболочки к диаметру 10^{-2} , оболочка может рассматриваться как плоская пленка (алюминиевая фольга). Ее толщина примерно в 250 раз меньше минимальной толщины фольги, получаемой

традиционными методами прокатки. Заметим, что характерной особенностью обсуждаемой фольги является газонепроницаемость, которая вытекает из самого метода ее изготовления.

Формирование пузырей происходит при нагреве частиц с Al ядром и равномерно распределенным по поверхности слоем $\text{Al}(\text{OH})_3$ до 750°C в окислительной атмосфере. Проведенный с помощью прибора Quanta 200 3D элементный анализ поверхности образцов, показал, что относительное количество алюминия в оболочках пузырей значительно превышает его относительное количество в Al_2O_3 на поверхности нагретых алюминиевых частиц, т.е. оболочки пузырей состоят в основном из металлического алюминия. Поскольку процесс формирования пузырей происходит в атмосфере, содержащей кислород, а готовые образцы хранились в атмосфере воздуха, то поверхность алюминиевых пузырей, изучавшихся инструментальными методами, должна быть окисленной, т.е. покрыта оксидной пленкой. Толщина такой пленки обычно составляет несколько нм.

Оболочки таких пузырей могут использоваться в микро- и наноэлектронике как основа для «сэндвич»-структур, содержащих нанослой алюминия. Благодаря высокой реакционной способности алюминия данные фольги могут быть использованы как прекурсоры тонких пленок оксида алюминия, нитрида алюминия, карбида алюминия и других соединений.

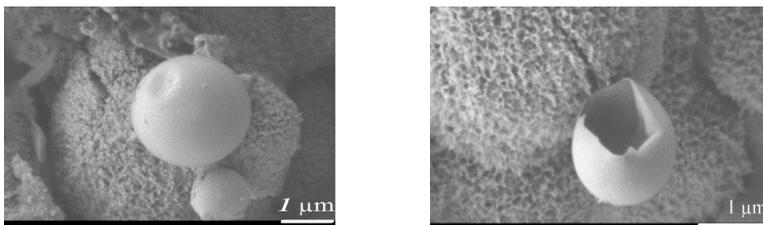


Рис. 1. Электронно-микроскопические снимки алюминиевых пузырей.

Список литературы

1. Ларичев М.Н., Шайтура Н.С., Артёмов В.В. Сферические алюминиевые оболочки (пузыри) с наноразмерной толщиной стенки – новый класс 2D – нанообъектов // Письма в ЖТФ, 2021, Т.47, вып. 8, с. 11-14. DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.508.45.18574.

А.Н. МАЙОРОВ¹, В.Я. НИКУЛИН^{1,2}, А.Б. МИХАЙЛОВА³,
П.В. СИЛИН², И.В. БОРОВИЦКАЯ³, Б.П. МИХАЙЛОВ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

³Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

В работе представлены результаты воздействия ударных волн, генерируемых в установке ПФ-4 "Тюльпан" (ФИАН) на изменение функциональных характеристик (критических параметров I_c , T_c , H_c) ленточных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) первого и второго поколения (Bi2223, Y123). Установлено, что критический ток сверхпроводящих лент зависит от параметров плазмы, расстояния от анода ПФ до мишени и количества ударов.

A.N. MAYOROV¹, V.Ya. NIKULIN^{1,2}, A.B. MIKHAILOVA³,
P.V. SILIN², I.V. BOROVITSKAYA³, B.P. MIKHAILOV³

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

³A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS, Moscow,

STUDY OF SHOCK-WAVE EFFECT ON HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS OF THE FIRST AND SECOND GENERATION

The paper presents the results of the impact of shock waves generated in the PF-4 "Tulip" (FIAN) installation on the change in functional characteristics (critical parameters I_c , T_c , H_c) of tape high-temperature superconductors (HTSC) of the first and second generation (Bi2223, Y123). It was found that the critical current of superconducting tapes depends on the plasma parameters, the distance from the PF anode to the target, and the number of impacts.

В последнее время акцент исследований на электроразрядных установках типа плазменных фокусах смещается с термоядерной тематики на прикладные работы, в частности на изучение воздействия плазменных потоков и частиц на материалы. Уникальная возможность ПФ заключается в том, что они позволяют за время одного импульса длительностью $\sim (10 - 1000)$ нс воздействовать на исследуемый образец одновременно или раздельно мощными импульсными потоками (плотность мощности вплоть до 10^{12} Вт/см²) ионов, плазмы, электронов, мягкого и жесткого рентгеновского

излучений, а также нейтронного излучения [1,2]. Комплексное воздействие на материалы может применяться для улучшения поверхностных свойств металлов [3], а также для улучшения критических параметров ленточных высокотемпературных сверхпроводников первого и второго поколения.

В работе исследовалось воздействие ударных волн, генерируемых в установке ПФ-4 "Тюльпан" (ФИАН) на изменение функциональных характеристик (критических параметров I_c , T_c , H_c) ленточных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) первого и второго поколения (Bi2223, Y123) [4].

Генерация ударных волн осуществлялась при ударе о материал мишени кумулятивного плазменного потока, генерируемого при сжатии на оси установки токово-плазменной оболочки. Время воздействия плазменного потока на мишень составляло ~ 50 нс. Плотность потока энергии на мишень $\sim (10^8-10^9)$ Вт/см² при скорости плазменного потока $\sim (1-4) \times 10^7$ см/с. Мишень представляла собой пластину толщиной 160–360 мкм из тугоплавкого материала (Mo, Ta или Ti). Одновременно эта мишень обеспечивала защиту ВТСП-образцов от прямого воздействия плазмы. Рабочим газом являлся аргон под давлением 2 мбар. Расстояние от поверхности образца до анода изменялось от 25 до 30 мм, а количество ударов от 2 до 15. Временной интервал между импульсами составлял 1/5 мин.

Таким образом, в ходе проведения экспериментов было установлено, что критический ток сверхпроводящих лент зависит от параметров плазмы, расстояния от анода ПФ до мишени и количества ударов.

Работа выполнена в рамках Госзаданий: темы № 075-00746-19-00, № 0023-2019-0006 и № 0023-2019-0004

Список литературы

1. С.Н. Полухин, А.Е. Гурей, В.Я. Никулин, Е.Н. Перегудова, П.В. Силин // физика плазмы, 2020, том 46, № 2, с. 99–109. DOI: 10.31857/S0367292120020080
2. А.Н. Майоров, В.Я. Никулин, А.В. Огинов, А.М. Жукешов. // Краткие сообщения по физике ФИАН 2015, 7.
3. Б.П. Михайлов, А.Б. Михайлова, В.Я. Никулин, И.В. Боровицкая, П.В. Силин // VI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ - ЛАПЛАЗ-2020», сборник научных трудов часть 1.
4. Колокольцев В.Н., Михайлов Б.П., Иванов Л.И., Боровицкая И.В., Никулин В.Я., Бондаренко Г.Г., Дорофеев Я.А. // Перспективные материалы. 2011. №5. С.18-22.

П.Е. ЛИТВИНОВА^{1,2}, И.А. КАМЕНСКИХ¹,
Р.Д. СВЕТОГОРОВ², А.В. ЕГОРЫШЕВА³, Е.Ф. ПОПОВА³

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, Россия

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СЛОЖНЫХ АНТИМОНАТОВ И ТАНТАЛАТОВ РЗЭ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ ПОРОШКОВОЙ ДИФРАКЦИИ НА СИНХРОТРОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Сложные оксиды РЗЭ относятся к крайне востребованным материалам в различных областях науки и техники. Представляют интерес их люминесцентные, магнитные, каталитические свойства. В работе рассмотрены функциональные сложные оксиды состава Ln-Sb и Ln-Ta. Данные соединения являются уникальными и систематическое изучение свойств новых сложных оксидов РЗЭ позволит создать более совершенные материалы на их основе. Образцы изучались методом порошковой рентгеновской дифракции на оборудовании экспериментальной станции РСА Курчатовского источника синхротронного излучения. Проведен полнопрофильный анализ полученных дифрактограмм методом Ритвельда, а также определен их фазовый состав.

P.E. LITVINOVA^{1,2}, I.A. KAMENSKIИ¹, R.D. SVETOGOROV², A.V.
EGORYSHEVA³, E.F. POPOVA³

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

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

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL FEATURES OF COMPLEX ANTIMONATES AND TANTALATES OF RARE EARTH ELEMENTS USING HIGH-RESOLUTION POWDER DIFFRACTION BY SYNCHROTRON RADIATION

Complex oxides of rare earth elements are highly demanded materials in various fields of science and technology. Their luminescent, magnetic, catalytic properties are of interest. In this work functional complex oxides of the composition Ln-Sb and Ln-Ta were considered. These compounds are unique and a systematic study of the properties of new complex rare-earth oxides will make it possible to create more advanced materials based on them. The samples were studied by X-ray powder diffraction on the equipment of the XSA beamline of the Kurchatov synchrotron radiation source. A full-profile analysis of the obtained diffractograms by the Rietveld method was carried out, and the phase composition of the samples was determined.

На основе танталатов РЗЭ создаются протонные проводники, которые могут использоваться для керамических топливных ячеек PCFC[1], а изучение структурных особенностей соединений Ln-Sb определяет уникальные возможности соединений с целью создания новых эффективных люминофоров. В исследованных системах размеры кристаллической решетки зависят от ионного радиуса иона РЗЭ, поэтому получение структурных параметров с высокой точностью является критически важным для определения расстояния между слоями, напрямую зависящих от размеров иона лантаноида.

Одним из основных методов исследования атомной структуры соединений является порошковая рентгеновская дифракция. В данной работе измерения проводились на станции РСА Курчатовского источника синхротронного излучения. Станция предназначена для исследования структуры объектов дифракционными методами на монохроматическом рентгеновском излучении при помощи двумерного детектора, который располагается под неким углом 2θ к образцу, что позволяет существенно улучшить угловое разрешение без потери углового диапазона.[2]

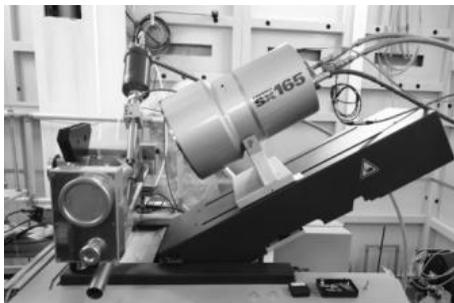


Рис.1 Внешний вид дифрактометра на станции РСА

Список литературы

1. A.V. Egorysheva, O.G. Ellert, E. Yu Liberman, D.I. Kiryankin, S.V. Golodukhina, O.M. Gajtko, R.D. Svetogorov, Synthesis and characterization of new isostructural series $\text{LnFe}_0.5\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ (Ln 1/4 La-Sm) exhibiting high catalytic activity in CO oxidation, 2019
2. Roman D. Svetogorov, Pavel V. Dorovatovskii, Vladimir A. Lazarenko. Belok/XSA diffraction beamline for studying crystalline samples at Kurchatov Synchrotron Radiation Source., Crystal Research and Technologies 55.5 (2020): 1900184. DOI: 10.1002/crat.201900184

М.Ю. ЛУКЪЯНОВ¹, А.Г.М. АХМЕД^{1,2}, А.А. БУШ³,
А.С. ПРОХОРОВ^{1,4}, В.Б. АНЗИН^{1,4}, В.А. АБАЛМАСОВ⁵,
Б.П. ГОШУНОВ¹, Л.Н. АЛЯБЬЕВА¹

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Университет Сохаг, Сохаг, Египет

³Институт материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия

⁴Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

⁵Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ЗАМЕЩЕНИЯ НА ТЕРАГЕРЦОВУЮ ЭЛЕКТРОДИНАМИКУ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ

Методами терагерцовой спектроскопии (частоты 2 - 110 см⁻¹, температуры 5-300 К) исследованы концентрационно-зависимые спектры комплексной диэлектрической проницаемости керамик гексаферрита бария с замещением свинцом: Ba_{1-x}Pb_xFe₁₂O₁₉, x=0.00-0.30. Обнаруженные в спектрах линии поглощения промоделированы с применением модели независимых лоренцианов, что позволило определить температурные зависимости параметров линий: резонансных частот, диэлектрических вкладов и затуханий. Предложены микроскопические модели, объясняющие природу наблюдаемых явлений.

M.Y. LUKIANOV¹, A.G. AHMED^{1,2}, A.A. BUSH³,
A.S. PROKHOROV^{1,4}, V.B. ANZIN^{1,4}, V.A. ABALMASOV⁵,
B.P. GORSHUNOV¹, L.N. ALYABYEVA¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

²Sohag University, Sohag, Egypt

³Moscow State Technical University of Radio engineering, Electronics and Automation,

⁴Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,

⁵Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk.

EFFECT OF IONIC SUBSTITUTION ON TERAHERTZ ELECTRODYNAMICS OF BARIUM HEXAFERRITES

Dielectric response of ceramic lead-doped barium hexaferrites Ba_{1-x}Pb_xFe₁₂O₁₉, x=0.00-0.30, was explored in the frequency range of 2 - 110 cm⁻¹ at temperatures from 5 to 300 K. The observed absorption lines were modeled using the model of independent Lorentzians. As a result, temperature dependencies of lines parameters were acquired: resonance frequencies, dielectric strengths and dampings. We propose microscopic models explaining the nature of observed processes.

Гексаферриты обладают уникальными электромагнитными характеристиками, составляют значительную часть мирового рынка магнитных материалов и активно используются в инженерии и приборостроении. Их сложная кристаллическая структура и высокая чувствительность магнитных и диэлектрических свойств к замещениям открывают широкие возможности для создания перестраиваемых приборов терагерцового диапазона (фильтры, фазовращатели и др.). Однако реализация этих возможностей ограничивается недостатком информации о фундаментальных процессах, определяющих терагерцовую электродинамику замещенных составов.

В данной работе методами терагерцовой спектроскопии временного разрешения был исследован ряд керамик гексаферрита бария, замещенного свинцом: $\text{Ba}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ($x=0.00-0.30$, шаг 0.05). Именно в этом диапазоне концентраций ожидается проявление температурно-чувствительной линии поглощения (мягкой моды), отсутствующей в недопированных материалах [1]. Чувствительность параметров линии к концентрации и температуре может позволить проводить подстройку функциональных параметров материала под конкретные задачи.

Полученные спектры комплексной диэлектрической проницаемости (частоты 2 - 110 см^{-1} , температуры 5-300 К) содержат богатый набор линий поглощения, включающий: а) резонансные возбуждения, связанные с электронными переходами в тонкой структуре энергетических состояний ионов Fe^{2+} [2] и б) мягкий оптический фонон [3]. Кроме того, обнаружено возбуждение, отсутствующее в нелегированных составах и проявляющее экзотическую температурную зависимость резонансной частоты $\omega_o(T)$, которая изменяется от $\sim 30 \text{ см}^{-1}$ при $T = 300 \text{ К}$ до $\sim 10 \text{ см}^{-1}$ при $T = 5 \text{ К}$, следуя «некохрановской» степенной зависимости $\omega_o^4 \sim (T - T_c)c$ концентрационно-зависимым параметром T_c . В докладе обсуждается природа данного нестандартного температурного поведения частоты мягкой моды, а также влияние на него концентрации ионов Pb^{2+} .

Терагерцовые измерения были выполнены при поддержке фонда РФФ грант 19-72-00055. Измерения в субтерагерцовом диапазоне выполнены при поддержке фонда РФФИ 20-32-90034.

Список литературы

1. L.Alyabyeva, et al. Effect of Chemical Pressure on Terahertz Electrodynamics of Barium Hexaferrite - Perspective Multiferroic. Proceedings of the International Congress on Graphene, 2D Materials and Applications, September 30 – October 04 2019, Sochi, Russia.
2. Alyabyeva L.A, et al. New Journal of Physics, 2019, vol. 21. p. 063016.
3. A.S.Mikheykin, et al. European Physical Journal B, vol.87, p.232.

Г.Х. МАВЛОНОВ, С.А. ТАЧИЛИН, Э. ШУКУРОВ

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С МАГНИТНЫМИ НАНОКЛАСТЕРАМИ АТОМОВ МАРГАНЦА

Показано, что в кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца наблюдаются новые фотомагнитные явления, которые существенно отличаются от существующих. Установлено, что в достаточно узком интервале интенсивности освещения, значением отрицательного магнитосопротивления можно управлять более чем в 100 раз.

G.KH. MAVLONOV, S.A. TACHILIN, E. SHUKUROV

Tashkent state technical university, Tashkent, Uzbekistan

FUNCTIONAL MATERIAL BASED ON SILICON WITH MAGNETIC NANOCCLUSERS OF MANGANESE ATOMS

It is shown that new photomagnetic phenomena are observed in silicon with magnetic nanoclusters of manganese atoms, which differ significantly from the existing ones. It was found that in a fairly narrow range of illumination intensity, the value of negative magnetoresistance can be controlled by more than 100 times.

В работе [1] было показано, что при определенных термодинамических условиях легирования в решетке кремния формируются нанокластеры, состоящие из 4-х атомов марганца ($3d^54s^2$), которые обладают достаточно мощным магнитным моментом, т.е. действуют как магнитные квантовые точки. В кремнии с нанокластерами атомов марганца при комнатной температуре наблюдается аномально-большой эффект отрицательного магнитосопротивления (ОМС), значение которого достигает более 100% [2]

Главная особенность этого материала состоит не только в обнаруженном аномально-большом ОМС, ни и также в существенном влиянии как фонового, так и ИК спектра на значение и характер ОМС, которое практически не наблюдается ни в одном из известных магнитных полупроводников. На рис.1 представлена зависимость ОМС в исследуемом материале от интенсивности фонового света при $T=300$ К. При этом установлено, что даже при наличии достаточно низкого уровня освещенности существенно уменьшается значение ОМС.

При интенсивности света $I=80$ Лк эффект ОМС в исследуемом материале исчезает, а при $I>100$ Лк происходит инверсия знака ОМС, т.е. ОМС переходит в положительное магнитосопротивление, значение которого слабо зависит от

интенсивности освещения. Таким образом, установлено, что в достаточно узком интервале интенсивности освещения, значением ОМС можно управлять более чем в 100 раз.

Интересные эффекты были обнаружены при освещении образцов кремния с магнитными нанокластерами ИК- светом с $\lambda=3\pm 1$ мкм (рис.2). Установлено, что при $\lambda=3$ мкм значение ОМС начинает заметно уменьшаться, т.е. происходит эффект ИК- гашения ОМС. С ростом энергии падающих фотонов эффект гашения существенно увеличивается, хотя мощность ИК- света достаточно низкая (около 10^{-6} Вт).

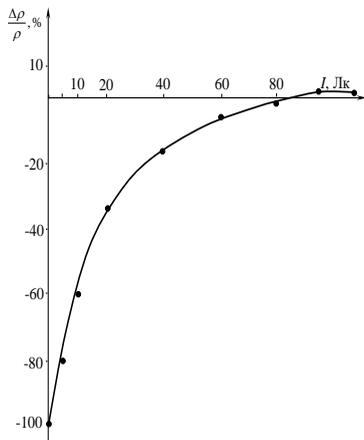


Рис.1. Зависимость магнито-сопротивления в образцах кремния с нанокластерами атомов марганца от интенсивности освещения.

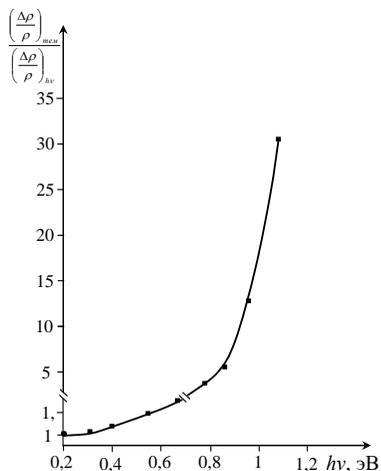


Рис.2. Спектральная зависимость кратности уменьшения ОМС под действием ИК- света, относительно темнового значения ОМС в образцах Si<B,Mn>.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что кремний с нанокластерами атомов марганца является очень перспективным материалом, обладающим уникальными функциональными возможностями и физическими свойствами.

Список литературы

1. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., and Iliyev Kh.M. Technical Physics, 2014, Vol. 59, No. 10, pp. 1556-1558.
2. Bakhadyrkhanov M.K., Ayupov K.S., Mavlyanov G.Kh., Isamov S.B. Semiconductors, 2010, Vol. 44, No. 9, pp. 1145-1148.

А.Н. МАКСИМОВА^{1,2}, И.А. РУДНЕВ^{1,2}, В.А. КАШУРНИКОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Научно-технологический университет «Сириус», Сочи, Россия

ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕВОЙ РЕШЕТКИ СЛОИСТОГО СВЕРХПРОВОДНИКА С ДЕФЕКТАМИ В ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

Численно рассчитаны вихревые конфигурации, возникающие в высокотемпературном сверхпроводнике в поле постоянного магнита. Изучено совместное влияние конфигурации дефектов и неоднородности поля на проникновение вихревых нитей с границы. Исследовано влияние параметра анизотропии ВТСП. На основе вихревых конфигураций рассчитано распределение токов в сверхпроводнике и сила левитации.

A.N. MAKSIMOVA, I.A. RUDNEV, V.A. KASHURNIKOV

¹National research nuclear university MEPHI, Moscow, Russia

²Sirius University of Science and Technology, Sochi, Russia

PECULIARITIES OF THE VORTEX LATTICE OF A LAYERED SUPERCONDUCTOR WITH DEFECTS IN THE FIELD OF A PERMANENT MAGNET

The vortex configurations arising in a high-temperature superconductor in the field of a permanent magnet are numerically calculated. The joint effect of the defect configuration and the inhomogeneity of the field on the penetration of vortex filaments from the boundary is studied. The influence of the anisotropy parameter of high temperature superconductors. The current distribution in the superconductor and the levitation force are calculated on the basis of the vortex configurations.

Высокотемпературные сверхпроводники широко используются на практике, к примеру, при создании постоянных магнитов [1], токоограничителей [2], в левитационной технологии [3]. Исследовались также левитационные свойства стопки ВТСП-лент [4]. При этом зачастую сверхпроводник находится под влиянием магнитного поля, когда пространственной неоднородностью поля нельзя пренебречь на расстояниях порядка размера образца.

В данной работе анализируется поведение вихревой решетки высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) в поле постоянного магнита. Расчеты выполнены методом Монте-Карло в рамках трехмерной модели слоистого ВТСП [5]. Неоднородность поля в расчете задается введением зависимости величины магнитного поля от номера сверхпроводящего слоя. Алгоритм реализован с учетом процессов рождения, уничтожения и движения вихревых нитей и их фрагментов. Рисунок иллюстрирует проникновение вихрей

в сверхпроводник. Особенностью является образование большого числа неполных вихревых нитей (а). В дефектном сверхпроводнике проникновение вихрей дополнительно задерживается дефектами (б).

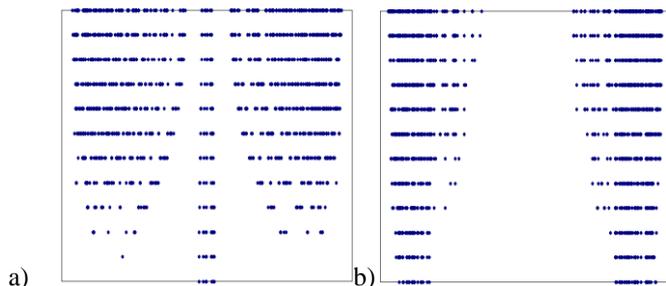


Рисунок. Вихревые конфигурации в неоднородном поле, а) чистый образец, б) образец с наноразмерными центрами пиннинга

На основе полученной в расчете вихревой конфигурации рассчитано распределение сверхпроводящих токов в каждом из ВТСП-слоев. Величина силы левитации, действующей на сверхпроводник в поле магнита, получена как суммарная сила Лоренца, действующая на токи со стороны магнитного поля. Получена зависимость силы левитации от расстояния до магнита. Проанализировано влияние температуры, различных конфигураций центров пиннинга и параметра анизотропии на левитационные свойства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51012.

Список литературы

1. Deng Z., MMiki, KTsuzuki, BFelder, RTaguchi, NShinohara, Mizumi, IEEETrans. Appl. Supercond. **21(3)**, 1180 (2011)
2. Yujun Dong, Jiahui Zhu, Defu Wei, Wei Chen, Qingqing Du, Ke Zhang, Panpan Chen, Hao Jiang, Shuai Wang, Tie Guo, Kaizhong Ding, Cryogenics **112**, 103195 (2020).
3. Sait Baris, Güner, Murat Abdioglu, Kemal Oztürk, Sükrü Çelik, Journal of Alloys and Compounds **822**, 153637 (2020)
4. Igor Rudnev, Dmitriy Abin, Maxim Osipov, Sergey Pokrovskiy, Yuriy Ermolaev, Nikolay Mineev, Phys. Procedia **65**, 141 – 144 (2015)
5. W.E. Lawrence, S. Doniach, in Proceedings of LT 12, Kyoto, 1970, edited by E.Kanda (Keigaku, Tokyo, 1971), 361

А.Н. МОРОЗ^{1,2}, И.А. РУДНЕВ^{1,2}, В.А. КАШУРНИКОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Научно-технологический университет «Сириус», Сочи, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАМАГНИЧЕННОСТИ ВТСП В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛЯ МАГНИТНОЙ ДОРОЖКИ.

Методом Монте-Карло выполнено моделирование образцов ВТСП в условиях неоднородного во времени магнитного поля. Рассмотрено влияние концентрации и конфигурации дефектов на устойчивость намагниченности образцов и гистерезисные потери, вызванные колебаниями внешнего магнитного поля. Определены оптимальные параметры дефектной структуры, обеспечивающие минимум гистерезисных потерь.

A.N. MOROZ^{1,2}, I.A. RUDNEV^{1,2}, V.A. KASHURNIKOV¹

¹National research nuclear university MEPHI, Moscow, Russia

²Sirius University of Science and Technology, Sochi, Russia

A STUDY OF THE RESISTANCE OF MAGNETIZATION OF A HTS TO LOCAL INHOMOGENEITIES OF THE FIELD OF A MAGNETIC TRACK

The Monte Carlo method has been used to simulate HTS samples in a time-nonuniform magnetic field. The influence of the concentration and configuration of defects on the stability of magnetization of samples and the hysteresis losses caused by oscillations of the external magnetic field have been considered. The optimal parameters of the defect structure providing the least hysteresis losses have been determined.

Одним из возможных направлений создания высокоскоростного транспорта является использование магнитолевитационных технологий на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Эффект магнитной левитации в таких системах может достигаться за счет устойчивого взаимодействия и движения транспортной тележки с ВТСП над дорожкой из постоянных магнитов, создающих градиентное магнитное поле. Неоднородность этого магнитного поля вдоль направления движения вызывает перемагничивание ВТСП и, соответственно, приводит к появлению гистерезисных потерь энергии, которые при определенных условиях приведут к нагреву сверхпроводника и потере устойчивости всей системы. Таким образом, исследование циклических процессов перемагничивания ВТСП является актуальной задачей.

В настоящей работе при помощи метода Монте-Карло в рамках модели слоистого ВТСП были произведены расчеты намагниченности образцов

высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) во внешнем магнитном поле, циклически отклоняющемся от постоянного значения (~ 0.1 Тл) на 25% в сторону уменьшения или увеличения. Моделируемые образцы содержали различные концентрации n_d и конфигурации точечных дефектов. Также были рассчитаны петли полного перемагничивания каждого из образцов в диапазоне магнитных полей от -0.2 до 0.2 Тл.

Были получены зависимости магнитного поля B внутри образцов от времени счета для случаев циклического изменения внешнего поля (рис. 1). Для образцов с конформной квадратной решеткой дефектов (confsq) и высокой n_d колебания намагниченности были наименьшими по амплитуде и связаны с релаксацией только приграничных, не закрепленных на дефектах вихрей. При этом магнитный профиль образца имел М-образную форму. Предположительно, для максимальной устойчивости намагниченности максимальное магнитное поле дорожки не должно превышать критического поля скачков потока (flux jumps) конкретного образца.

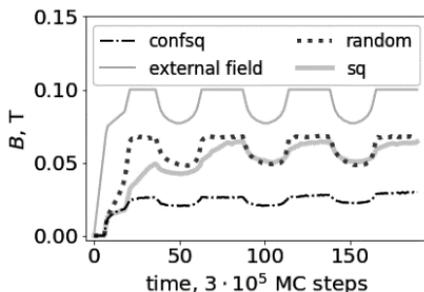


Рис. 1. Зависимости магнитного поля внутри образцов с $n_d=2 \cdot 10^9$ см⁻² в различных конфигурациях от времени счета в шагах Монте-Карло. Тонкая серая линия в верхней части рисунка изображает поведение внешнего магнитного поля.

При помощи кривых перемагничивания были оценены гистерезисные потери образцов, вызванных неоднородностями внешнего поля. Выявлены наиболее эффективные конфигурации и концентрации дефектов, обеспечивающие минимум потерь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51012.

А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ, И.А. РУДНЕВ,
А.Н. МАКСИМОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИМПУЛЬСНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ ВТСП С РАЗЛИЧНЫМИ КОНФИГУРАЦИЯМИ ПИННИНГА.

Проведена серия расчетов Монте-Карло для моделирования вихревой динамики ВТСП с различными концентрациями и конфигурациями пиннинга под действием импульсного намагничивания. Исследовано влияние температуры образца на относительную эффективность рассмотренных образцов при разных амплитудах импульсов. Продемонстрирована скачкообразная релаксация потока из образцов с конформными отображениями квадратной и треугольной решеток дефектов.

A.N. MOROZ, V.A. KASHURNIKOV, I.A. RUDNEV,
A.N. MAKSIMOVA

National research nuclear university MEPhI, Moscow, Russia

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE PULSED MAGNETIZATION OF A HTS WITH VARIOUS PINNING CONFIGURATIONS

A series of Monte Carlo calculations has been performed to simulate the vortex dynamics of a HTS with various pinning concentrations and configurations under pulsed magnetization. The effect of ambient temperature on the relative efficiency of the considered samples has been studied at various pulse amplitudes. A jump-like flux relaxation from samples with conformal transformations of square and triangular lattices of defects has been demonstrated.

Импульсное намагничивание ВТСП является удобным инструментом для создания псевдопостоянных магнитов с захваченным потоком на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Поведение вихревой системы ВТСП под действием быстро меняющегося магнитного поля во многом определяется температурой образца, а также его структурой пиннинга, и потому существенно влияет на итоговый захваченный поток. В связи с этим подбор оптимальных температурных режимов и параметров дефектов сверхпроводящего материала для наиболее эффективного намагничивания является актуальной задачей.

Предметом исследований настоящей работы являлся высокотемпературный сверхпроводник $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi-2212), на который действовали импульсы внешнего магнитного поля экспоненциальной формы [1]. Методом Монте-Карло проведено численное моделирование вихревой динамики образцов с разными

концентрациями дефектов ($n_{\text{def}} = (0.8-5.3) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$), расположенных в различных периодических структурах. Температура образца T варьировалась в пределах от 5 до 30 К, амплитуда импульсов H_0 – от 600 до 2100 Э.

Получены зависимости захваченного магнитного поля $B_t(H_0)$ для разных образцов (рис. 1). Продемонстрированы отличия в эффективности различных конфигураций пиннинга (например, квадратной решетки (sq) и ее конформного отображения (confsq)) с изменением количества дефектов и температуры: для малых и средних концентраций конформное отображение оказалось эффективнее прямой решетки, и напротив для высоких концентраций. Определены поля насыщения рассмотренных образцов и их зависимость от температуры.

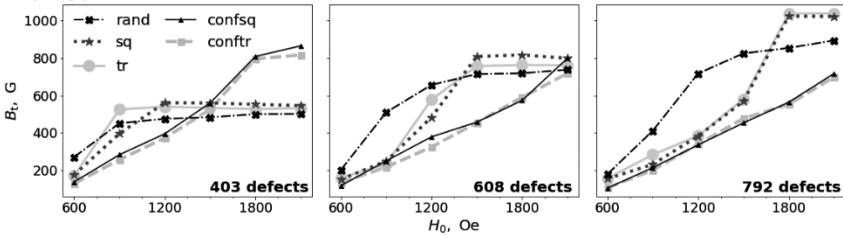


Рис. 1. Зависимости захваченного поля от амплитуды импульсов для образцов с разным количеством дефектов в различных конфигурациях при температуре 30 К.

Обнаружена сильная релаксация магнитного потока в образцах с конформными отображениями квадратной и треугольной решеток дефектов для средних концентраций. Данное явление наблюдалось при высоких T и H_0 и сопровождалось ступенчатым процессом срыва вихрей с приграничных дефектов и заполнением вакантных мест вихрями из центральной области образца. Причина подобного поведения заключалась в высокой плотности дефектов вблизи границ для данного типа распределения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-32-90279 и 17-29-10024.

Список литературы

1. Moroz A.N., Kashumikov V.A., Rudnev I.A., and Maksimova A.N. (2021). J. Phys. Condens. Matter 33(14), 145902.

Ж.Х. МУРЛИЕВА^{1,2}, Р.М. ЭМИРОВ¹, М.Х. РАБАДАНОВ,
М.Э. ИСХАКОВ¹, Д.К. ПАЛЧАЕВ¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства,
Махачкала, Россия

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $Ti_{67}Al_{33}$ ПОСЛЕ ЗАКАЛОК ОТ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Показано, что при соответствующих термообработках, образец $Ti_{67}Al_{33}$ возвращается к одному из воспроизводимых равновесных состояний со значениями электросопротивления на температурных зависимостях $\rho(T)$ в интервале от $1.88 \cdot 10^{-6}$ до $1.97 \cdot 10^{-6}$ (Ohm·m)

ZH.KH. MURLIEVA^{1,2}, R.M. EMIROV¹, M.KH. RABADANOV¹,
M.E. ISKHAQOV¹, D.K. PALCHAEV¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

ELECTRIC RESISTANCE OF INTERMETALLIDE $Ti_{67}Al_{33}$ AFTER HARDENING FROM DIFFERENT TEMPERATURES

It is shown that with appropriate heat treatments the sample $Ti_{67}Al_{33}$ returns to one of the reproducible equilibrium states with the values of electrical resistance on the temperature dependences $\rho(T)$ in the ranges from $1.88 \cdot 10^{-6}$ to $1.97 \cdot 10^{-6}$ (Ohm·m)

Интерметаллиды обладают высокими значениями удельного электросопротивления (ρ) из-за большой константы электрон-фононного взаимодействия и статического беспорядка, создаваемого локальными термическими разупорядочениями, которые возникают в результате диффузионных фазовых переходов. Для интерметаллида состава $Ti_{67}Al_{33}$ со структурой α_2 -фазы Ti_3Al , в виду широкой области гомогенности этой фазы, характерна смена металлической проводимости на полупроводниковую и, обратно, в широком интервале (300K – 1000K) температур. Закалки от различных температур в указанном интервале могут задавать равновесные состояния с различным соотношением металлического и ковалентного типов межатомного взаимодействия.

На рисунке 1а приведены результаты исследования температурных зависимостей ρ двух исходных образцов $Ti_{67}Al_{33}$, вырезанных из одной заготовки («закалка» - быстрое остывание на воздухе при изготовлении) и после их закалки от 1100°C в воду. Как видно, для них значения ρ в исходном состоянии и после закалок хорошо согласуются. После многократных циклов нагрев-охлаждение

(3х – 4х) этого интерметаллида с низкими скоростями (~1,5°С/мин), наблюдаемый на зависимостях $\rho(T)$ гистерезис, практически исчезает. Это свидетельствует об установлении равновесной структуры образца.

На рисунке 1б приведены результаты исследования температурных зависимостей ρ второго образца уже для стабилизированных состояний после закалок от различных температур.

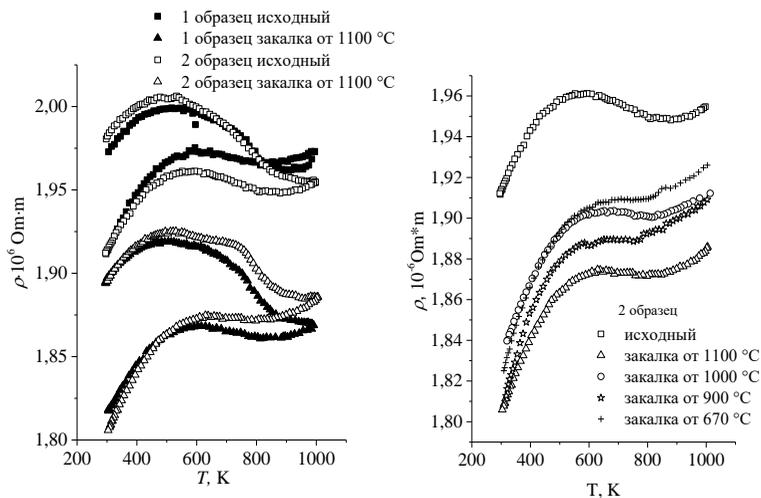


Рис.1. Результаты исследования зависимостей $\rho(T)$: (1а) – для двух исходных образцов $\text{Ti}_{67}\text{Al}_{33}$ и после их закалки от 1100°C в воду; (1б) – для второго образца в его стабилизированном состоянии после закалок от различных температур.

Такой эффект в интерметаллиде $\text{Ti}_{67}\text{Al}_{33}$, представляющим собой сплав «вычитания» с вакансиями одного из элементов (Ti) в атомной решетке, возникает ввиду того, что ему характерны диффузионные фазовые переходы и возможность стабилизации соответствующих фаз. Устойчивость этих состояний системы обеспечивается образованием кластеров с упорядоченным и неупорядоченным расположением атомов. Воспроизводимость таких состояний позволяет задавать необходимые значения электросопротивления в этом интерметаллиде путем соответствующих термообработок.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002.

Н.Н. НИЁЗБЕКОВ, И.В. САЙКОВ, А.Ю. МАЛАХОВ,
И.В. ДЕНИСОВ

*ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г.
Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ СОЕДИНЕНИЯ АМГ6–А0–Ст.3 ПОСЛЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В данной работе была изучена микроструктура границы соединения и механические свойства сталеалюминиевого композиционного материала АМГ6–А0–Ст. 3 после сварки взрывом и термической обработки. Энергодисперсионный анализ показал наличие интерметаллических фаз FeAl и FeAl₃ (550–600 HV) на границе соединения А0–Ст. 3. Средняя прочность на отрыв после сварки взрывом составила 96 МПа. После термической обработки прочность на отрыв увеличилась на 16 МПа.

N.N. NIYOZBEKOV, I.V. SAIKOV, A.YU. MALAKHOV,
I.V. DENISOV

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS, Chernogolovka,
Russia*

STUDY OF ALMG6–ALUMINIUM–CARBON STEEL WELD INTERFACE AFTER EXPLOSIVE WELDING AND HEAT TREATMENT

In this study, the weld interface microstructure and mechanical properties of the AlMg6–aluminium–carbon steel composite material after explosive welding and heat treatment was analyzed. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis showed the presence of a hard and brittle FeAl and FeAl₃ intermetallic compounds (with 550–600 HV). The average tear strength after explosive welding was 96 MPa. The tear strength increased by 16 MPa after the heat treatment.

Сталеалюминиевые композиционные материалы (СКМ) благодаря сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и возможности значительного удешевления конструкции широко применяются в различных отраслях промышленности. Например, СКМ применяются для изготовления переходников для нужд вагоно-и судостроения, токоподводов для электролизеров при производстве алюминия и др. [1]. При получении СКМ основной проблемой, на данный момент, является образование на границе соединения хрупких интерметаллических фаз, которые значительно снижают эксплуатационные свойства СКМ [2]. Таким образом, актуальной задачей современного материаловедения является получение бездефектного соединения в СКМ с требуемой прочностью составляющих слоёв. Один из методов получения СКМ является сварка взрывом (СВ). Цель работы заключалась в

исследовании влияния режимов сварки взрывом и термической обработки на структуру и свойства границы соединения АМг6–А0–Ст. 3.

Для эксперимента по СВ были использованы: алюминивно-магниевый сплав АМг6 (4×200×250 мм), алюминий А0 (1×200×250 мм) и сталь Ст. 3 (10×200×250 мм). Биметаллический лист был получен по режиму СВ: скорость детонации – 2550 м/с, скорость метания пластины – 920 м/с. Результаты механических испытаний образцов на отрыв приведены в таблице 1.

Таблица 1. Распределение прочности на отрыв по всей длине биметаллического листа

*№ образца	Прочность на отрыв плакирующего слоя, МПа							Средняя прочность, МПа
	1	2	3	4	5	6	7	
После СВ	105	107	97	100	96	75	92	96
После ТО (Т–200 °С, выдержка –1 час)	114	138	127	137	107	69	94	112
*Образцы пронумерованы по направлению процесса СВ: 1–образец из начального участка биметаллического листа								

На границе соединения алюминия и Ст.3 образовалась сплошная прослойка интерметаллических фаз FeAl и FeAl₃ толщиной 50–70 мкм и микротвердостью 550–600 НV. На некоторых участках прослойки наблюдались трещины, которые возникли в результате высокой скорости охлаждения при кристаллизации, что также наблюдалось в работе [1] при сварке взрывом алюминия АД1 со сталью Ст. 3. Граница соединения между АМг6 и А0 имела безволновую структуру на начальном участке и развитую волнообразную форму на конечном. Таким образом, сваркой взрывом был получен биметаллический лист с прочностью соединения на отрыв 96 МПа. Прочность на отрыв после ТО составила 112 МПа.

Список литературы

1. Гуревич Л.М., Проничев Д. В., Трудов А.Ф., Трыков Ю. П., Трунов М.Д. Исследование влияния режимов сварки взрывом и термической обработки на структуру и свойства биметалла АД1-сталь СТ3. Известия Волг ГТУ. 2014. № 23 (150). С. 15-18.
2. Carvalho G.H.S.F.L., Galvão I., Mendes R., Leala R.M., Loureiro A. Explosive welding of aluminium to stainless steel. Journal of Materials Processing Tech. 262 (2018) 340–349.

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

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

²Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН ПРИ СИНТЕЗЕ НАНОЧАСТИЦ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В работе обсуждается метод формирования наночастиц/кластеров Au, Ag и биметаллических Au-Ag с использованием лазера с перестраиваемой длиной волны. Наночастицы благородных металлов были синтезированы методом лазерной абляции мишеней из золота и серебра с применением источников лазерного излучения в жидкость.

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

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

²Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich
Stoletovs, Vladimir, Russia

DIFFERENT WAVELENGTH LASER IRRADIATION DURING THE SYNTHESIS OF NOBLE-METAL NANOPARTICLES

The paper discusses a method for the formation of nanoparticles/lusters of Au, Ag and bimetallic Au-Ag using a tunable wavelength laser. Noble metal nanoparticles were synthesized by laser ablation of gold and silver targets using laser radiation sources in a liquid.

В работе обсуждается метод формирования наночастиц/кластеров Au, Ag и биметаллических Au-Ag с использованием лазера с перестраиваемой длиной волны [1]. Наночастицы благородных металлов были синтезированы методом лазерной абляции в различные типы жидкости мишеней из золота и серебра с применением источника лазерного излучения с перестраиваемой длиной волны. Управление размерами синтезируемых частиц приводит к контролю их оптикофизических свойств и делает возможным эмпирический подбор параметров лазерного эксперимента для обеспечения повторяемости получаемых результатов [2].

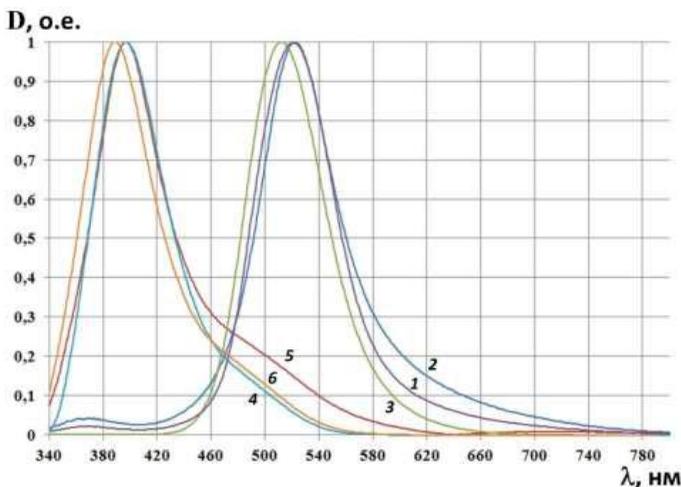


Рис. 1. Оптические спектры нормированного коэффициента поглощения коллоиднаночастиц, полученных при непрерывном лазерном воздействии на мишени серебра и золота, размещенные в различных жидких фазах: 1 – золотые частицы в глицерине; 2 – золотые частицы в воде; 3 – золотые частицы в этиловом спирте; 4 – серебряные частицы в глицерине; 5 – серебряные частицы в воде; 6 – серебряные частицы в этиловом спирте.

Управление оптическими свойствами таких наноструктур при их синтезе открывает новые перспективы развития коллоидной химии. Установлено, что спектры пропускания/поглощения полученных структур принципиально зависят от размеров, концентрации наночастиц золота и серебра в коллоидном растворе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-10022, частично в рамках проектов РФФИ № 20-02-00515 и № 20-32-90052.

Список литературы

1. A G Putilov, A A Antipov, A E Shepelev, A A Lotin, S M Arakelyan. Control of the alexandrite lasing spectrum. «20th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures», Journal of Physics: Conference Series, Volume 1331, 2019.
2. Arakelian, S., Kutrovskaya, S., Kucherik, A., Osipov, A., Povolutckaia, A., Povolotskiy, A., Manshina, A., Laser-induced synthesis of nanostructured metal-carbon clusters and complexes, Optical and Quantum Electronics, Volume 48, Issue 11, 1 November 2016.

Д.К. ПАЛЧАЕВ¹, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ¹,
Ж.Х. МУРЛИЕВА^{1,2}, М.Х. РАБАДАНОВ¹, А.Э. РАБАДАНОВА

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства, Махачкала, Россия

ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ ДОПИРОВАНИЯ НАНОКЕРАМИКИ YBCO ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ

Показано, что в наноструктурированных керамиках YBCO в результате разложения основной сверхпроводящей фазы (~92K) уровень допирования (p) снижается. Установлена корреляция между p этих керамик и обратной величиной ширины перехода ($1/\Delta T_c$) в сверхпроводящее состояние.

D.K. PALCHAEV¹, S.KH. GADZHIMAGOMEDOV¹,
ZH.KH. MURLIEVA^{1,2}, M.KH. RABADANOV¹,
A.E. RABADANOVA¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

CHANGING THE LEVEL OF DOPING OF YBCO NANO CERAMICS WITH INCREASING STRUCTURE DEFECTS

It is shown that in nanostructured YBCO ceramics as a result of decomposition of the main superconducting phase (~92K), the level of doping (p) is reduced. There is a correlation between p and the reciprocal of width of the transition ($1/\Delta T_c$) of these ceramics into the superconducting state.

Наноструктурированным керамикам YBCO, изготовленным из нанопорошков, синтезированных золь-гель методом, характерна высокая дефектность решетки вплоть до атомарного уровня. Повышение такой дефектности приводит к разложению основной сверхпроводящей фазы (~92K) на фазы с различными значениями T_c . Обычно деградация основной сверхпроводящей фазы, связанная с уменьшением стехиометрии по кислороду, для моно- и микрокристаллических керамик YBCO происходит с возрастанием числа фаз с низкими значениями T_c ($< 92K$) и уширением интервала сверхпроводящего перехода в сторону низких температур. Особенность полученных наноструктурированных керамик YBCO в том, что они содержат фазы со значениями $T_c > 92K$. Для них температура начала перехода в сверхпроводящее состояние ($T_{c \text{ нач.}}$) оказывается выше (~96K), т.е. уширение перехода происходит и в сторону высоких температур. Это видно на рисунке 1а, где представлена зависимость производной электросопротивления по

температуре $(d\rho/dT)/(d\rho/dT)_{\text{макс}}$, приведенной к ее максимальному значению, от температуры для двадцати образцов (S1-S20), отличающихся плотностью, дисперсностью частиц, кислородной стехиометрией, а так же технологическими параметрами при получении.

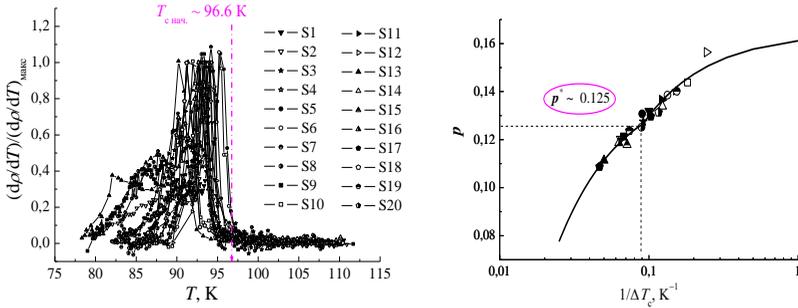


Рис. 1. Температурные зависимости $d\rho/dT$ от температуры и результаты, демонстрирующие корреляцию между p и величиной обратной ширины перехода $(1/\Delta T_{\text{с}})$ в сверхпроводящее состояние

Начало первого пика со стороны высоких температур (рис.1а) определяет значение $T_{\text{с, нач}}$. Температура полного перехода образца в сверхпроводящее состояние ($T_{\text{с, кон.}}$) определялась при $d\rho/dT=0$. Значения температур $T_{\text{с, конц}}$ использовались для оценки p по известной формуле:

$$p = 0.16 - [(1 - T_{\text{с, конц.}}/T_{\text{с, макс.}})/82.6]^{1/2},$$

где за максимальную температуру сверхпроводящего перехода для основной фазы YBCO, принималась $T_{\text{с, макс.}} = 92 \text{ K}$. Поскольку уширение интервала сверхпроводящего перехода для моно- и микрокристаллических керамик YBCO происходит в результате возрастания числа фаз с меньшим уровнем допирования, то представлял интерес вопрос, как изменяется уровень допирования наноструктурированной керамики YBCO при повышении дефектности ее структуры. Для таких оценок ширина интервала перехода каждого образца в сверхпроводящее состояние, обусловленная распадом основной фазы, определялась по значениям $T_{\text{с, нач}}$ и $T_{\text{с, кон.}}$. Как видно на рисунке 1б, значения p и $(1/\Delta T_{\text{с}})$ для этих керамик коррелируют в области перехода решетки YBCO от орто- II к фазе орто- I.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002 и частично грантом РФФИ № 18-08-00092а.

С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.В. АНИЩЕНКО, Д.А. АБИН,
Д.В. САВЧЕНКОВ, И.А. РУДНЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ МИКРОННОГО РАЗМЕРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Выполнено исследование магнитных и транспортных характеристик ВТСП лент второго поколения с искусственными дефектами микронного масштаба. Дефекты созданы с помощью коротких лазерных импульсов, длительностью 2 пс. Мы рассмотрели несколько пространственных картин расположения дефектов: равномерный треугольный массив, градиентный и конформный массив дефектов. С помощью транспортных измерений и исследования намагниченности были получены зависимости критического тока и намагниченности от размера дефекта и расстояния между дефектами на образцах с различным расположением дефектов. Методом конечных элементов проведено моделирование процессов создания дефектов с помощью ультракоротких лазерных импульсов. Предложена модель реализации повышения критического тока в ВТСП лентах с помощью искусственных дефектов микронного масштаба.

S.V. POKROVSKII, I.V. ANISHCHENKO, D.A. ABIN,
D.V. SAVCHENKOV, I.A. RUDNEV

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

STUDY OF THE MICRON SIZE DEFECTS INFLUENCE ON THE SECOND GENERATION HTS TAPES CHARACTERISTICS

The study of the magnetic and transport characteristics of the second generation HTS tapes with artificial micron-scale defects has been carried out. Defects were created by short laser pulses of 2 ps duration. We examined several spatial patterns of the location of defects: a uniform triangular array, a gradient and conformal array of defects. Using transport measurements and studying the magnetization, the dependences of the critical current and magnetization on the size of the defect and the distance between defects on samples with different locations of defects were obtained. The finite element method was used to simulate the processes of creating defects using ultrashort laser pulses. A model is proposed for the implementation of an increase in the critical current in HTS tapes using micron-scale artificial defects.

Современные технологии производства проводов и лент на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) позволяют получать высокие магнитные и токонесущие характеристики материалов. При этом, для их использования зачастую требуется не только более высокий критический ток или захваченный поток сверхпроводника, но также и однородность

распределения по длине ВТСП ленты. Традиционными способами, например введением нанодобавок, решить такую задачу достаточно сложно, поскольку требуется управляемая локализация искусственных дефектов в материале, а также изменение параметров уже изготовленной промышленной ВТСП ленты.

В настоящей работе мы представляем результаты исследований возможности управления магнитными и токонесущими характеристиками ВТСП лент второго поколения с помощью создания массивов искусственных дефектов микронного диапазона. Методом конечных элементов проведено моделирование процессов создания дефектов микронного размера с помощью ультракороткого лазерного воздействия (сквозных и несквозных). Для получения дефектов был использован пикосекундный лазер (длина волны 870 нм, длительность – 2 пс) с фокусировкой. Размер полученных дефектов варьировался от 3.5 до 14 мкм в диаметре. Воздействие производилось непосредственно на ВТСП слой ленты.

Были исследованы конфигурации в виде треугольного массива, градиентного и конформного распределения дефектов в сверхпроводнике. На основе данных электронной микроскопии и структурного анализа показано отсутствие деградации сверхпроводящей пленки в прилегающей области искусственного дефекта. Были проведены комплексные магнитные и электрофизические исследования исходных и модифицированных образцов. На основе моделей течения потока и вихревого пути были проведены оценки изменения силы пиннинга в сверхпроводнике. Сделан вывод о коллективном пиннинге вихревой системы при наличии дефектов микронного масштаба. Показано положительное влияние создаваемых дефектов на характеристики ВТСП ленты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00811.

В.В. ПОПОВ¹, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ¹,
С.Г. РУДАКОВ¹, Н.В. БОЙКО¹, Н.В. ОГНЕВСКАЯ²,
Н.А. ЦАРЕНКО², О.Н. СЕРЕГИНА², Л.Т. МАКАРОВА²,
И.В. ЩЕТИНИН³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²АО ВНИПИПромтехнологии, Москва, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРУ ПОРОШКОВ $\text{BaBi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)

Влияние условий синтеза на структуру $\text{BaBi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$), полученных соосаждением оксалатов и карбонатов, было изучено с помощью рентгеновской дифракции, ИК спектроскопии, синхронного термического анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой

V. V. POPOV¹, A. P. MENUSHENKOV¹, A. A. YASTREBTSEV¹,
S. G. RUDAKOV¹, N. V. BOYKO¹, N. V. OGNEVSKAYA²,
N. A. TSARENKO², O. N. SEREGINA², L. T. MAKAROVA²,
I. V. SHCHETININ³

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

²JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

THE EFFECT OF THE SYNTHESIS CONDITIONS ON THE STRUCTURE OF $\text{BaBi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) POWDERS

The effect of the synthesis conditions on the structure $\text{BaBi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) powders prepared by coprecipitation with oxalates and carbonates were studied using X-ray diffraction, infrared spectroscopy, simultaneous thermal analysis, and inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy.

Перовскитоподобные оксиды $\text{BaBi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$), содержащие металлы с переменной валентностью, представляют собой большую группу материалов, перспективных для получения ВТСП. Такие структуры имеют сложную фазовую диаграмму со многими структурными фазами, зависящими как от уровня легирования, так и от температуры. Традиционным методом их получения является твердофазный синтез.

Порошки $\text{BaVi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) были получены путем соосаждения водного раствора смеси нитратов $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Vi}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ оксалатом $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ или карбонатом $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ аммония. Величину pH суспензии регулировали добавлением NH_4OH . Промытые, высушенные и размолотые порошки прекурсоров прокаливали на воздухе при $700\text{-}900^\circ\text{C}/3$ ч. Были подобраны условия синтеза прекурсоров (вид осадителя, концентрации исходных реагентов, способ их смешения, pH суспензии), обеспечивающие получение прекурсоров с химическим составом, максимально близким к требуемой стехиометрии. Установлено, что полученные прекурсоры представляют собой смешанные оксалаты или карбонаты металлов. Нагрев оксалатных прекурсоров приводит к протеканию процессов гидратации ($100\text{-}170^\circ\text{C}$), разложения ($250\text{-}550^\circ\text{C}$), образования и кристаллизации ($> 600\text{-}700^\circ\text{C}$) соответствующих сложных оксидов состава $\text{BaVi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$ (рис. 1). Процессы, происходящие при нагревании карбонатов, имеют более сложный характер. Показано, что прокаливание всех типов прекурсоров при $\geq 800^\circ\text{C}/3$ ч на воздухе обеспечивало получение однофазных крупнокристаллических порошков BaViO_3 (моноклинная фаза, пр. гр. $I12/m1(12)$), BaPbO_3 (орторомбическая фаза, пр. гр. $Imma(74)$), $\text{BaPb}_{0.75}\text{Vi}_{0.25}\text{O}_3$ (орторомбическая фаза, пр. гр. $Ibmm(74)$) с размером ОКР более 100 нм (рис. 2).

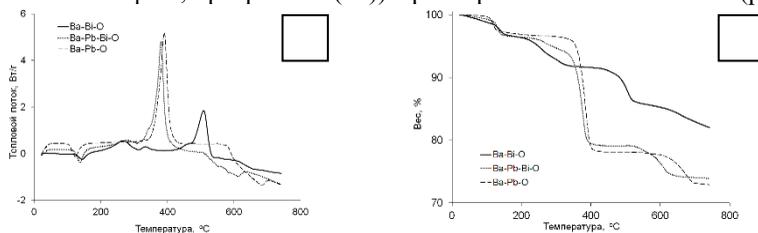


Рис. 1. Кривые ДСК (а) и ТГ (б) оксалатных прекурсоров $\text{BaVi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$

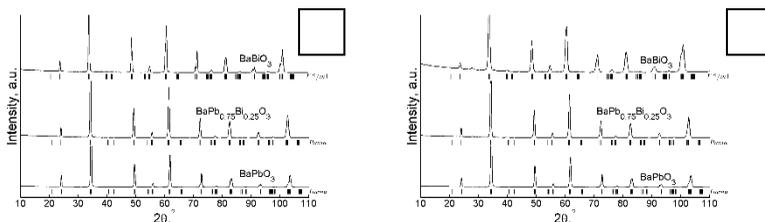


Рис. 2. Дифрактограммы порошков $\text{BaVi}_x\text{Pb}_{(1-x)}\text{O}_3$, синтезированных отжигом оксалатных (а) и карбонатных (б) прекурсоров при 800°C .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-02-4001_мега).

В.В. ПОПОВ¹, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ¹,
С.Г. РУДАКОВ¹, Ф.Э. ДУБЯГО¹, Н.В. ОГНЕВСКАЯ²,
Н.А. ЦАРЕНКО², О.Н. СЕРЕГИНА², Н.Е. БАБЕНКОВА²,
И.В. ЩЕТИНИН³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²АО ВНИПИПромтехнологии, Москва, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ХРОМАТОВ R3Э

Кристаллическая и локальная структура хроматов R3Э, полученных методом соосаждения, была изучена с помощью рентгеновской дифракции, ИК спектроскопии, СТА, АЭС-ИСП. Установлено, что химический состав и кристаллическая структура как прекурсоров, так и отожженных порошков существенно зависит от вида R3Э.

V.V. POPOV^{1,2}, A.P. MENUSHENKOV¹, A.A. YASTREBTVSEV¹,
R.G. RUDAKOV¹, F.E. DUBYAGO¹, N.V. OGNEVSKAYA²,
N.A. TSARENKO², O.N. SEREGINA², N.E. BABENKOVA², I.V.
SHCHETININ³

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

²JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology,
Moscow, Russia

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

FEATURES OF THE CRYSTAL AND LOCAL STRUCTURE OF *Ln* CHROMATES

The crystal and local structure of *Ln* chromates prepared by coprecipitation was studied using XRD, IR, STA, ICP-AES methods. It has been established that the chemical composition and crystal structure of both precursors and calcined powders depends significantly on the *Ln* type.

В настоящее время хроматы/хромиты R3Э представляют большой интерес как с научной, так и с практической точек зрения. Хромиты, обладающие высокой огнеупорностью и хорошей проводимостью электронного типа, нашли применение в качестве токопроводящих систем энергетических установок и нагревательных элементов высокотемпературных печей сопротивления с окислительной атмосферой. Хроматы R3Э обладают мультиферроидными свойствами, связанными с взаимодействием магнитной и электрической подсистем, являются высокотемпературными сверхпроводниками, обладают гигантским магнетосопротивлением и т.д.

Порошки хроматов РЗЭ были синтезированы путем осаждения водных растворов нитратов РЗЭ $Ln(NO_3)_3$ хроматом калия K_2CrO_4 с последующим изотермическим отжигом прекурсоров на воздухе при $450^\circ C$.

Было установлено, что все синтезированные прекурсоры хроматов можно разделить на 2 группы: легких РЗЭ ($Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu$) с атомным отношением $Ln: Cr = 1 : 1.5$, имеющих моноклинную структуру (пр. гр. $P2_1/c$) (рис. 1а), и тяжелых РЗЭ и иттрия ($Ln = Gd, Dy, Ho, Yb, Y$) с $Ln: Cr \leq 1 : 1$, являющихся рентгеноаморфными. Использование СТА позволило сделать вывод, что синтезированные прекурсоры хроматов легких РЗЭ ($Ln = La - Sm$) описываются общей формулой $Ln_2(CrO_4)_3 \cdot 7H_2O$, а для европия - $Eu_2(CrO_4)_3 \cdot 4H_2O$. Их отжиг при $450^\circ C$ /1 ч привел к образованию дегидратированных хроматов состава $Ln_2(CrO_4)_3$. В случае тяжелых РЗЭ ($Ln = Gd, Dy, Ho$ и Y) наряду с дегидратацией наблюдалась кристаллизация прекурсоров (кроме Yb) с образованием хроматов состава $LnCrO_4$, имеющих тетрагональную структуру (пр. гр. $I4_1/a$) (рис. 1б). Сделан вывод, что уменьшение радиуса РЗЭ способствует разупорядочению структуры хроматов (т.е. образованию и сохранению аморфной фазы).

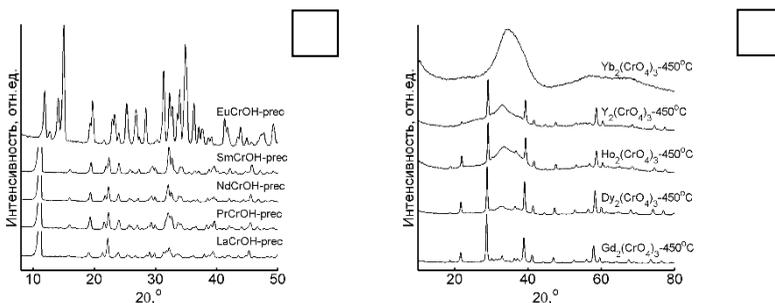


Рис. 1. Дифрактограммы прекурсоров хроматов легких РЗЭ (La, Pr, Nd, Sm, Eu) (а) и термообработанных порошков тяжелых РЗЭ (Gd, Dy, Ho, Yb, Y).

Использование ИК-спектроскопии позволило сделать вывод о наличии в структуре синтезированных прекурсоров нескольких типов воды. Таким образом, локальную структуру прекурсоров хроматов легких РЗЭ ($Ln = La, Pr, Nd, Sm$), можно представить в виде $[Ln_2(CrO_4)_3(H_2O)_5] \cdot 2H_2O$.

Работа выполнена в рамках Госзадания на НИР (проект FSWU-2020-0035) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

А.Р. ПРИЩЕПА^{1,2}, А.В. САДАКОВ², А.В. МУРАТОВ²

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

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

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ТЕПЛОЁМКОСТИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Была разработана методика выбора параметров теплоёмкости нормальной фазы вблизи сверхпроводящего перехода для корректного разделения электронного и решёточного вкладов в теплоёмкость на примере селенида железа. Также выработаны рекомендации по определению погрешностей параметров теплоёмкости нормальной и сверхпроводящей фаз.

A.R. PRISHCHENPA^{1,2}, A.V.SADAKOV², A.V. MURATOV²

¹*NationalResearchNuclearUniversityMEPhI, Moscow, Russia*

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

PROCESSING TECHNIQUE FOR SPECIFIC HEAT OF SUPERCONDUCTORS

A technique was developed for selecting parameters of normal phase specific heat (SH) near superconducting transition for the correct separation of electronic and lattice contributions. SH of iron selenide was used as example. Also, recommendations were developed for determining errors in specific heat parameters of normal and superconducting phases.

При исследованиях теплоёмкости сверхпроводников основной проблемой является выделение электронного вклада на фоне большого решёточного вклада. Последний может составлять до 95% от полной теплоёмкости при температурах близких к температуре сверхпроводящего перехода. В связи с этим возникает необходимость корректного определения параметров нормальной фазы.

Особую трудность вызывает теплоёмкости решётки. Для её описания можно использовать схожее по кристаллическому строению, но несверхпроводящее родственное соединение, если такое существует. Численное моделирование решётки весьма трудоёмкая процедура. Поэтому в большинстве случаев используют модель Дебая. Тогда теплоёмкость нормальной фазы можно записать как $C/T = \gamma_N + \beta T^2$, где γ_N – это постоянная Зоммерфельда нормальной электронной фазы, β – решёточный коэффициент из модели Дебая [1].

Данную формулу удобно применять с линейным методом наименьших квадратов (МНК). Но выбор температурного диапазона, в котором применима модель, неоднозначен. Поскольку при фиксировании начальной точки вблизи конца сверхпроводящего перехода было выявлено, что чем больше точек

содержит температурный диапазон, тем ближе коэффициент корреляции к единице. С другой стороны, модель Дебая работает хуже с ростом температуры.

Для решения этой проблемы необходимо рассмотреть значения параметров γ_N и β в зависимости от начальной и конечной температуры, на которых применяется модель. В полученном графике трёхмерной поверхности нужно выделить пологую область, на которой значения параметра существенно не меняется. Именно эта область даст границы применимости модели, а значения параметра в каждой точке области определит его среднее значение и погрешность. На рисунке 1 приведен график для постоянной Зоммерфельда сверхпроводника FeSe (селенид железа). Данные были взяты из статьи [2].

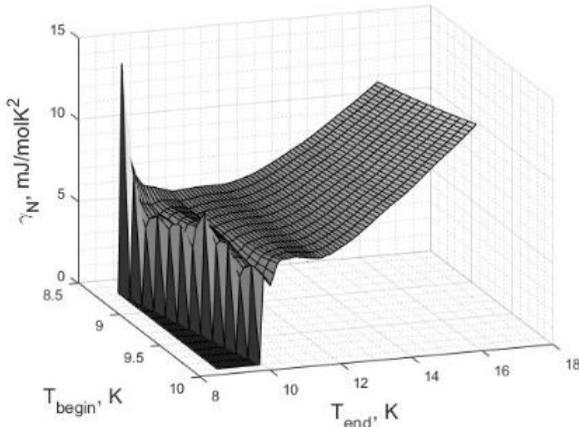


Рис.1. Параметр γ_N в зависимости от начальной и конечной температуры.

Для получения безразмерной электронной теплоёмкости сверхпроводящей фазы необходимо воспользоваться формулой $C_{es}/\gamma_N T = (C/T - \beta T^2)/\gamma_N$. Во время этой операции в качестве параметров γ_N и β будут выступать их средние значения и значения с границ погрешности. В результате будет получена серия зависимостей электронной теплоёмкости от температуры, каждая из которых даст свои наборы параметров сверхпроводящего конденсата. И из их множества нужно выделить погрешности.

Список литературы

1. Abdel-Hafiez M., Aswartham S., Wurmehl Set.al., Phys. Rev. B 85, 134533 (2012).
2. Muratov A.V., Sadakov A.V. , et. al., Physica B: Condensed Mater, 536 (2018).

А.Э. РАБАДАНОВА, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ,
М.Х. РАБАДАНОВ, Д.К. ПАЛЧАЕВ, Р.М. ЭМИРОВ,
Ж.Х. МУРЛИЕВА, П.М. САЙПУЛАЕВ

Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

СТРУКТУРА ПЛЕНОК СОСТАВА $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$

Исследована структура пленок феррита висмута (BiFeO_3) на поверхности нанотрубчатого диоксида титана (TiO_2) – $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$. Установлено, что в образце $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$ присутствуют, в основном, фазы BiFeO_3 на ~ 54% и TiO_2 на ~ 32%, а также побочная фаза Bi_2O_3 на ~ 4%. Размер кристаллитов для $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$ после термообработки при 500 °С составляет ~ 36 нм.

A.E. RABADANOVA, S.KH. GADZHIMAGOMEDOV,
M.KH. RABADANOV, D.K. PALCHAEV, R.M. EMIROV,
ZH.KH. MURLIEVA, P.M. SAIPULAEV

Dagestan State University, Makhachkala, Russia

STRUCTURE OF FILMS OF COMPOSITION $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$

The structure of bismuth ferrite (BiFeO_3) films on the surface of nanotubular titanium dioxide (TiO_2) – $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$ has been studied. It was found that the $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$ sample contains mainly the BiFeO_3 phases by ~ 54% and TiO_2 by ~ 32%, as well as the secondary phase Bi_2O_3 by ~ 4%. The crystallite size for $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$ after heat treatment at 500 °C is ~ 36 nm.

В работе исследована структура пленок феррита висмута (BiFeO_3) на поверхности нанотрубчатого диоксида титана (TiO_2). Нанотрубки состава TiO_2/Ti были получены методом анодного окисления титановых пластин в течение 4 часов при напряжении 60В с использованием этиленгликоля ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) и фторида аммония (NH_4F). Термическая обработка пленок проводилась при температуре 500 °С, после которого содержание фазы анатаза TiO_2 в них составляло примерно 91%. На поверхность этих нанотрубок в последующем наносился слой BiFeO_3 методом атомно-слоевого осаждения. Полученные пленки ($\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$) были термообработаны при 500 °С в течение 1 часа (скорость нагрева до этой температуры ~ 5 °С/мин). На рисунке 1 приведены результаты исследования структуры пленок $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$ и TiO_2/Ti , а также для сравнения нанопорошка BiFeO_3 (содержание фазы не менее 96%), синтезированного [1] золь-гель методом. У образца $\text{BiFeO}_3/\text{TiO}_2/\text{Ti}$ после обработки при 500 °С наряду с пиками для углов 2θ при значениях – примерно 22.6, 31.9, 32.2, 39.6, 45.9, 51.5, 57.1, 70.7 и 76.3, соответствующей структуре BiFeO_3 (карта JCPDS № 98-018-1982), наблюдаются и пики при углах примерно

25.5, 38.1, 48.1 и 63, характерные нанокристаллической фазы анатаза (карта JCPDS № 98-009-2363).

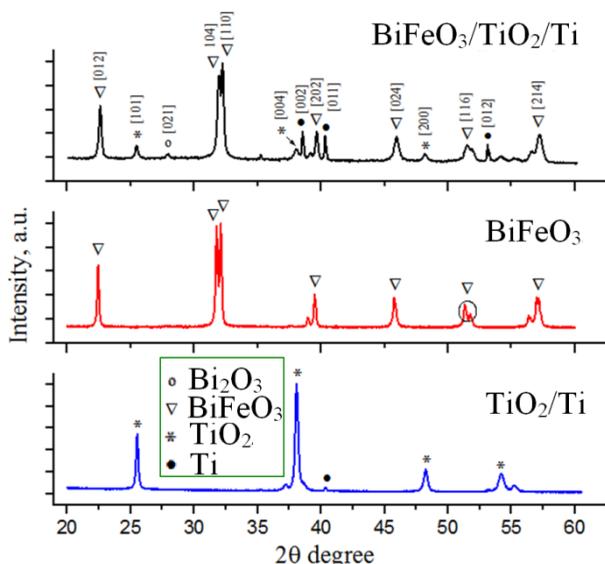


Рис. 1. Диффрактограммы пленок TiO₂/Ti и BiFeO₃/TiO₂/Ti, а также для сравнения нанопорошка BiFeO₃.

Согласно результатам фазового состава установлено, что образец BiFeO₃/TiO₂/Ti состоит, в основном, из фазы BiFeO₃ на ~ 54% и фазы TiO₂ на ~ 32%, при этом содержание побочной фазы (Bi₂O₃) составляет не более 4%. Наблюдаются пики, относящиеся к структуре металлической подложки из титана, наличие которых характерно пленочным структурам. Размер кристаллитов для BiFeO₃/TiO₂/Ti после термообработки при 500 °С составляет ~ 36 нм.

Работа была поддержана проектом «УМНИК» 14057ГУ/2019 и частично грантом ГЗ FZNZ-2020-0002.

Список литературы

1. Садьков С.А., Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х. и др. // Физика твердого тела. – 2017. – 59 (9). – pp. 1747-1753.

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

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

Исследовано влияние химического состояния тонкопленочного прекурсора WO₃ на формирование морфологии нанопленок WSe₂ в процессе быстрого селенирования. Наиболее эффективное выделение водорода обнаружено для гетероструктуры a-MoS₄/WSe₂, которая содержала WSe₂ в форме кристаллов-лепестков толщиной ~ 50 нм, ориентированных перпендикулярно поверхности подложки.

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

National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

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

The influence of the chemical state of the thin-film precursor WO₃ on the formation of the morphology of WSe₂ nanofilms during rapid selenation is studied. The most efficient hydrogen evolution was found for the a-MoS₄/WSe₂ photocathode that contained WSe₂ in the form of petal crystals of ~ 50 nm thickness and these petals were oriented perpendicular to the substrate surface.

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

В работе исследовано влияние морфологии нанослоев WSe₂ на эффективность фото-активированной реакции выделения H₂ на фотокатоде a-MoS₄/WSe₂. Для поиска оптимальных по структуре фото-активных слоев WSe₂

проводилась термохимическая обработка в парах селена тонкопленочных прекурсоров WO_x , предварительно полученных методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО). На поверхность пленок WSe_2 также методом ИЛО наносился тонкий слой аморфного сульфида молибдена.

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

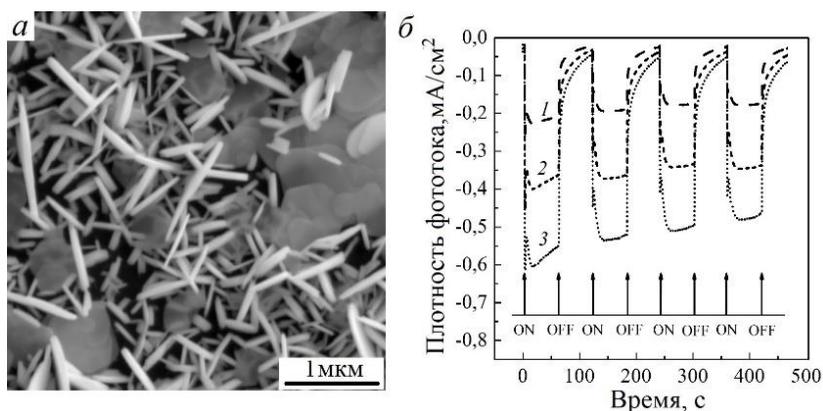


Рис. 1. а – Микро-изображение пленки WSe_2 , полученной селенированием прекурсора $WO_{2,7}$, б – хроноамперометрические кривые для $\alpha-MoS_4/WSe_2$, в которых пленки WSe_2 были получены селенированием прекурсоров $WO_{2,1}$ (1), $WO_{2,9}$ (2) и $WO_{2,7}$ (3).

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

Список литературы

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

О.В. РУБИНСКОВСКАЯ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ,
А.А. СОЛОВЬЕВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТО-
АКТИВИРОВАННОЙ ЭВОЛЮЦИИ H₂ НА НАНО-ИГОЛЬЧАТЫХ
ПЛЕНКАХ WO₃ С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ 2H-WS₂ И
АМОРФНЫМИ a-MoS_xCO-КАТАЛИЗАТОРАМИ**

Исследованы механизмы получения слоев нано-игольчатого WO₃, нанокристаллического дисульфида вольфрама (WS₂) и аморфного сульфида молибдена (MoS_x) в гибридных структурах WS₂/WO₃ и a-MoS_x/WO₃. Установлено влияние температуры и времени обработки на структурное-фазовое состояние, морфологию и оптические свойства фотокатодов WS₂/WO₃ и a-MoS_x/WO₃, а также их фотоэлектрокаталитическую активность в реакции выделения водорода в кислотном растворе.

O.V. RUBINKOVSKAYA, D.V. FOMINSKI, R.I. ROMANOV,
A.A. SOLOVIEV, V.YU. FOMINSKI

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

**COMPARATIVE STUDIES OF PHOTO-ACTIVATED H₂
EVOLUTION ON NANO-NEEDLE WO₃ FILMS WITH
CRYSTALLINE 2H-WS₂ AND AMORPHOUS
Sa-MoS_x CO-CATALYSTS**

The features of the formation of nano-needle films of tungsten trioxide (WO₃), nanocrystalline tungsten disulfide (WS₂) and amorphous sulfide (MoS_x) in the hybrid structures WS₂/WO₃ and a-MoS_x/WO₃ have been investigated. The effect of temperature and time on the structural-phase state, morphology, and optical properties of WS₂/WO₃ and a-MoS_x/WO₃ photocathodes, as well as their photoelectrocatalytic activity in the reaction of hydrogen evolution in an acidic solution, has been established.

В последние годы активно развивается “зеленая” энергетика. Требуются новые каталитические материалы, способные обеспечить эффективное получение водородного топлива путем расщепления воды под солнечным светом. Одним из перспективных компонентов полупроводникового катализатора является WO₃. Триоксид вольфрама может быть использован для создания фотокатализаторов прямой Z-схемы в комбинации с рядом сульфидов, в частности, WS₂ и a-MoS_x.

Применение реакционного импульсного лазерного осаждения (РИЛО) позволяет наносить нано-игольчатые пленки WO₃ с моноклинной и триклинной

кристаллической решеткой (рис. 1 а). В результате сульфидирования пленок WO_3 в сероводороде при $350^\circ C$, сформировалась пленка, состоящая из более плотно упакованных нанокристаллов с размером до 100 нм. (рис. 1 б). Нанесении пленок $\alpha-MoS_x$ методом РИЮ не вызывало заметного изменения морфологии.

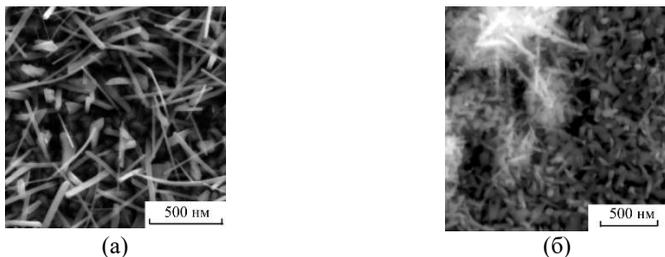


Рис. 1. СЭМ изображения лазерно-осажденных на подложки FTO тонкопленочных слоев WO_3 : (а) до сульфидирования, (б) после сульфидирования в H_2S .

Структуры WS_2/WO_3 обеспечивали повышенную эффективность в фотоэлектрокаталитическом процессе эволюции H_2 . Осаждение $\alpha-MoS_x$ вызывало существенное улучшение электрокаталитических характеристики $\alpha-MoS_x/WO_3$, однако фото-активность такой структуры оказалась менее выраженной (рис. 2). Рассмотрены факторы, влияющие на электро- и фотоэлектрокаталитические свойства созданных наноструктур.

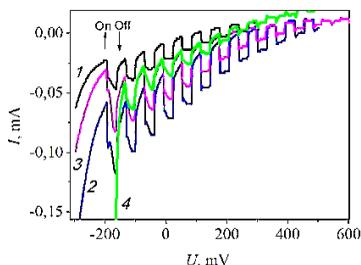


Рис. 2 – Влияние включения/выключения света на линейные вольтамперные диаграммы в растворе H_2SO_4 для $WS_2/WO_3/FTO$ (время сульфидирования 1 – 1, 2 – 7 и 3 – 12 мин) и $\alpha-MoS_x/WO_3/FTO$ (4).

Работа выполнена в рамках Госзадания на НИР (проект FSWU-2020-0035) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

К.Н. РЫКУН, А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ,
И.А. РУДНЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ПИННИНГА НА ОСТАТОЧНУЮ НАМАГНИЧЕННОСТЬ ВТСП

Методом Монте-Карло исследовано влияние параметров различных дефектных структур на эффективность пиннинга в ВТСП. Рассмотрены симметричные, локально симметричные и несимметричные распределения дефектов. Особое внимание уделено распределению в виде треугольной решетки с базисом из наклонных цепочек 5-7 точечных дефектов («трешотка»). Продемонстрировано влияние параметров «трешотки» на эффективность захвата потока и возникновение эффектов подстройки вихревой решетки.

K.N. RYKUN, A.N. MOROZ, V.A. KASHURNIKOV, I.A. RUDNEV
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

THE EFFECT OF PINNING CONFIGURATION ON THE RESIDUAL MAGNETIZATION OF A HTS

The effect of the parameters of various defect structures on the pinning efficiency in HTSs has been studied using the Monte Carlo method. Symmetric, locally symmetric, and asymmetric defect distributions have been considered. Special attention was paid to the distribution in the form of a triangular lattice with a basis of tilted chains of 5–7 point defects (the "ratchet"). The influence of the ratchet parameters on the flux trapping efficiency and the occurrence of matching effects has been demonstrated.

Поиск оптимальных конфигураций пиннинга (дефектов) в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) имеет существенное практическое значение. Для современных применений ВТСП важно повышение не только критического тока, но и эффективности захвата магнитного потока, во многом определяемой дефектной структурой материала. Тем не менее экспериментальный подбор оптимальных параметров пиннинга затруднен, поэтому особое значение приобретает численное моделирование.

В настоящей работе проведены расчеты кривых перемагничивания образцов сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) с различными конфигурациями одного и того же количества дефектов N_{def} . Было рассмотрено случайное распределение дефектов, треугольная решетка и ее конформное отображение [1], а также локально несимметричное распределение в виде треугольной решетки с базисом из наклонных цепочек дефектов (именуемое в данной работе «трешоткой»). Все расчеты выполнены континуальным методом Монте-Карло в рамках модели слоистого ВТСП [2].

Продемонстрирована эффективность распределения дефектов в виде «трещотки» для захвата магнитного потока. Рассмотрено влияние различных параметров «трещотки» на величину остаточной намагниченности M_{res} : угол наклона базиса решетки ϕ и количество дефектов N_{bas} в нем, постоянная основной решетки a . Получена немонотонная зависимость $M_{res}(\phi)$ (рис. 1 (слева)), имеющая максимум при угле наклона $\pi/6$ и обусловленная изменением размеров междефектных областей в направлении движения вихрей. Для образца с таким углом наклона базиса и $N_{bas}=7$ наблюдался пик кривой перемангничивания, связанный с подстройкой вихревой решетки под структуру дефектов. Было показано, что подбор параметров данного распределения может привести к улучшению эффективности захвата потока образцом. Путем одновременного изменения угла наклона базиса и количества дефектов в нем удалось добиться одинаковой остаточной намагниченности для образцов с разными N_{def} (рис. 1 (справа)).

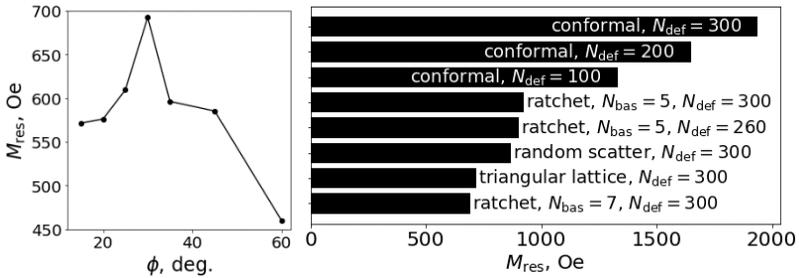


Рис. 1. (слева) Зависимость остаточной намагниченности в образце с «трещоткой» из 300 дефектов и $N_{bas}=7$ от угла наклона базиса; (справа) Сравнение величин остаточной намагниченности для различных распределений дефектов.

Расчеты для конформного распределения дефектов показали наибольшую величину остаточной намагниченности из всех рассмотренных конфигураций – даже для N_{def} , в три раза меньше, чем в случае «трещоток». Однако для полного намагничивания подобных образцов необходимо использовать гораздо больший (в 2-3 раза) диапазон магнитных полей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00085.

Список литературы

1. Zyubin M. V., Rudnev I. A., and Kashurnikov V. A. (2003). JETP 96(6), 1065-1077.
2. Ray D., Reichhardt, C., and Reichhardt, C. O. (2014). Phys. Rev. B 90(9), 094502.

П.С. САВЧЕНКОВ, П.А. АЛЕКСЕЕВ

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕЙЗЕНБЕРГОВСКОГО АНТИФЕРРОМАГНЕТИКА ($S=1/2$) НА КВАДРАТНОЙ РЕШЁТКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В рамках сферически-симметричного самосогласованного подхода для двух-временных запаздывающих спин-спиновых функций Грина развивается теория двумерного квантового $S=1/2$ антиферромагнетика. Показано, что в присутствии магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости антиферромагнетика, в спектре спиновых возбуждений могут наблюдаться три моды. Обсуждается применимость теории к описанию влияния магнитного поля на резонансную моду в кондо-изоляторах.

P.S. SAVCHENKOV, P.A. ALEKSEEV

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE ANTIFERROMAGNETIC SPIN-1/2 HEISENBERG MODEL ON THE SQUARE LATTICE IN A MAGNETIC FIELD

The theory of a two-dimensional quantum $S = 1/2$ antiferromagnet is developed within the framework of self-consistent rotation-invariant Green's function method. It is shown that spin-waves in an ordered square quantum antiferromagnet in a magnetic field perpendicular to antiferromagnetic plane may demonstrate three modes of spin excitations. The application of the theory to the description of the effect of magnetic field on the resonance mode in Kondo insulators is discussed.

В настоящей работе исследованы магнитные свойства двумерного квантового антиферромагнетика на квадратной решётке. Вычисление в рамках сферически симметричного подхода спектров спиновых возбуждений и динамических структурных факторов показывает, что магнитное поле приводит к формированию трёхпиковой структуры спектра спиновых возбуждений (см. рисунок 1). Отметим, что величина расщепления пропорциональна величине магнитного поля и достигает максимального значения на границе магнитной зоны Бриллюэна.

В отличие от стандартных двухподрешеточных методов, в предложенном подходе сохраняется как трансляционная, так и осевая симметрия, обеспечивается точное выполнение условия одноузельного спинового констрейнта для каждой из трёх мод.

Представлено сравнение полученных результатов с численными работами по точной диагонализации и экспериментами по неупругому рассеянию нейтронов. Обсуждается применимость данной модели для описания влияния магнитного поля на спиновую динамику в кондо-изоляторах YbB_{12} и SmB_6 .

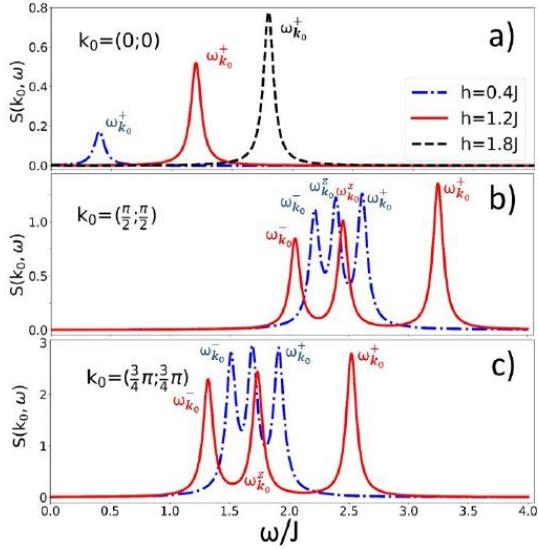


Рис. 1. Динамический структурный фактор для трёх точек первой зоны Бриллюэна: а) $\mathbf{k}_0=(0,0)$ б) $\mathbf{k}_0=(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ в) $\mathbf{k}_0=(\frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4})$ Представлены результаты вычисления для значений магнитного поля $h=0.4J$ (штрихпунктирная линия), $h=1.2J$ (сплошная линия) и $h=1.8J$ (штриховая линия).

И.В. САЙКОВ, С.А. СЕРОПЯН, Г.Р. САЙКОВА

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им.А.Г.Мерджанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

РЕАКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ W-ПТФЭ-АЛ

Проведены термодинамические расчеты адиабатических температур и вероятного состава продуктов горения в системах W-ПТФЭ и W-ПТФЭ-Ал. Проведены эксперименты по ударно-волновому нагружению реакционных материалов системы W-ПТФЭ-Ал. Установлено, что системы на основе вольфрама и политетрафторэтилена являются трудно инициируемыми ударом и нагревом. Добавка алюминия повышает чувствительность к ударно-волновому нагружению, что позволяет рассматривать такие смеси перспективными при разработке высокоплотных реакционных материалов.

I.V. SAIKOV, S.A. SEROPYAN, G.R. SAIKOVA

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of
Sciences, Chernogolovka, Russia*

REACTION MATERIALS BASED ON W-PTFE-AL POWDER MIXTURE

Thermodynamic calculations of adiabatic temperatures and the probable composition of combustion products in W-PTFE and W-PTFE-Al systems have been carried out. Experiments on shock-wave loading of reaction materials of the W-PTFE-Al system were carried out. It has been found that systems based on tungsten and polytetrafluoroethylene are difficult to initiate by impact and heating. The addition of aluminum increases the sensitivity to shock-wave loading, which makes it possible to consider such mixtures promising in the development of high-density reaction materials.

Реакционные материалы (РМ) представляют собой смесь порошков металлов, неметаллов и фторполимеров, которые инертны в нормальных условиях, но способны к интенсивному тепловыделению при сильном механическом или тепловом воздействии [1].

Объектом исследования являлась смесь порошков вольфрама и политетрафторэтилена (ПТФЭ), обладающая низкой чувствительностью к ударно-волновому воздействию и тепловому инициированию. Для реализации ударно-волнового синтеза и самоподдерживающейся экзотермической реакции использовалась добавка порошка алюминия. Цель работы заключалась в подборе оптимального состава РМ на основе вольфрама, ПТФЭ и алюминия для получения высокоплотных продуктов горения при помощи численного расчета температур, состава и доли конденсированных продуктов, а также определения чувствительности к ударно-волновому нагружению.

В качестве объекта исследований выбраны порошки вольфрама марки ПВ2, ПТФЭ марки Ф-4НТД-2 и алюминия марки АСД-1. Предварительные термодинамические расчеты позволили определить оптимальное соотношение вольфрама и ПТФЭ (4 к 1), а также долю алюминия. На основе численных расчетов приготовлены следующие составы № 1 – 76%W-5%Al-19%ПТФЭ; № 2 – 72%W-10%Al-18%ПТФЭ; № 3 – 64%W-20%Al-16%ПТФЭ; № 4 – 56%W-30%Al-16%ПТФЭ. Скорость горения измерялась на образцах в виде параллелепипеда размерами 5x5x20 мм в среде аргона и воздуха при давлении 0,1 МПа и в вакууме при помощи термопар и видеосъемки. Определение способности к ударно-волновому инициированию проводили по методике, описанной в работе [3].

Температура воспламенения вышеупомянутых составов составила порядка 800 °С. Скорость горения составов № 1-4 в аргоне и на воздухе составила 2; 2,5; 5; 2,5 мм/с, а в вакууме она снизилась почти в 10 раз: 0,2; 0,3; 0,6; 0,2 мм/с соответственно. Температура горения составов составила 2000; 2100; 1650; 1450 °С. Установлено, что состав № 1 не способен к самоподдерживающейся экзотермической реакции при нормальных условиях и для ее осуществления проводился подогрев образца до 280 °С. После ударно-волнового нагружения пластина-ударник оказалась приварена к матрице. В ячейках № 2 произошла сильная экзотермическая реакция, продукты которой пробили метаемую пластину толщиной 2,5 мм, а в ячейке с составом № 3 произошло вздутие пластины без пробития. Составы № 1 и 4 не оставили видимых следов на пластине. РФА подтвердил прохождение химических реакций в исследуемых составах. Составы № 2 и 3 с максимальной полнотой превращения являются наиболее перспективными для использования в качестве высокоплотного реакционного материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00640-А

Список литературы

1. Imkhovik N.A., Svidinsky A.V., Smirnov A.S. and others// *Combust. Explos. Shock Waves*. 2017. Vol. 10, № 1, P. 93–101.
2. Alymov M.I., Vadchenko S.G., Gordopolova I.S. and others// *Inorg. Mater.* 2018. Vol. 54, № 11, P. 1175–1182.
3. Saikov I. V., Seropyan S. A., Saikova G. R. and others// *Dokl. Phys. Chem.* 2020, Vol. 492, № 1, P. 1–4.

И.Е. СЕМЕНЧУК, В.А. ЩЕРБАКОВ, А.Н. ГРЯДУНОВ,
М.И. АЛЫМОВ

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им.
А. Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Российская Федерация*

ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И КОНСОЛИДАЦИЯ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ TiC-ZrC

В работе представлены результаты экспериментального исследования по получению ультратугоплавкого композита TiC-ZrC методом электротеплового взрыва под давлением. Изучено влияние режимов механической активации на формирование однофазного твердого раствора на основе карбидов титана и циркония и микроструктуры синтезированного композита.

I.E. SEMENCHUK, V.A. SHERBAKOV, A.N. GRYADUNOV,
M.I. ALYMOV

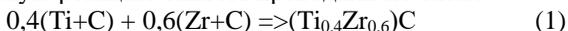
*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of
Sciences, Chernogolovka, Russian Federation*

EXOTHERMIC SYNTHESIS AND CONSOLIDATION OF THE TiC-ZrC CERAMICS

The paper presents the results of an experimental study on production of the TiC-ZrC ultra-high-melting composite by electro-thermal explosion (ETE) under pressure. The effect of mechanical activation modes on the formation of a single-phase solid solution based on titanium and zirconium carbides and the microstructure of the synthesized composite has been studied.

Ультравысокотемпературные керамические композиты (УВТК) на основе тугоплавких соединений переходных металлов (боридов, нитридов и особенно карбидов) представляют большой интерес для современной авиационно-космической техники. Такие материалы перспективно использовать для созданий изделий, работоспособных в экстремальных условиях при температуре >2040°C в окислительном газовом потоке [1]. УВТК обладают высокой температурой плавления, высокой окислительной стойкостью и устойчивостью к термоудару. В ИСМАН разработан эффективный метод получения таких композитов, сочетающий экзотермический синтез в режиме электротеплового взрыва (ЭТВ) и консолидацию горячего продукта в условиях квазизостатического сжатия. Лабораторная установка для осуществления синтеза ЭТВ описана в [2].

Экзотермическую реакцию синтеза проводили по схеме:



Реакционную смесь готовили из порошков титана (марки ПТМ), циркония (марки ПЦрК-1) и углерода (марки П804-Т) в планетарном активаторе АГО-2С

при ускорении мелющих тел 100g. Механическую активацию порошков проводили в две стадии. На первой производили активированное смешение порошков титана и циркония. На второй – к полученным смесям активированных металлических порошков добавляли сажу и смешивали в течение 4 минут.

Полученную смесь помещали в реакционную пресс-форму. И осуществляли экзотермический синтез в режиме ЭТВ под давлением 100 МПа.

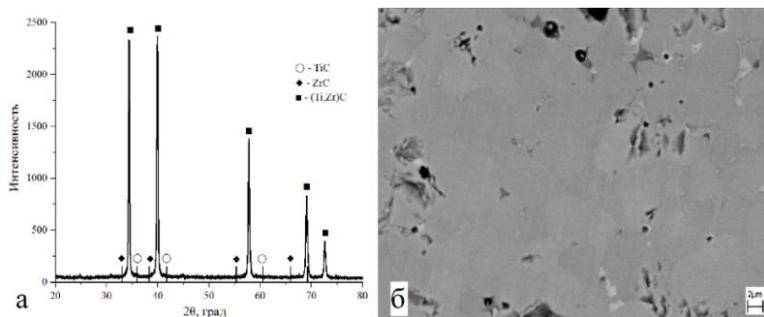


Рис. 1. Рентгенограмма (а) и микроструктура (б) конечного продукта.

На рисунке 1а представлена дифрактограмма конечного продукта, полученного методом ЭТВ под давлением. Видно, что дифракционные пики синтезированного продукта занимают положения между углами, соответствующими дифракционным пикам однофазных карбидов титана и циркония. Это указывает на образование однофазного твердого раствора $(\text{Ti}_{0.4}\text{Zr}_{0.6})\text{C}$, который образовался в результате взаимной диффузии титана, циркония и углерода.

Микроструктура полученного композита представлена рис. 1б. Видно, что размер зерен твердого раствора составляет 2-5 мкм, а остаточная пористость полученного композита составляет менее 10%.

Таким образом, впервые синтезирован ультратугоплавкий композит, содержащий однофазный твердый раствор $(\text{Ti}_{0.4}\text{Zr}_{0.6})\text{C}$ методом электротеплового взрыва под давлением.

Список литературы

1. Orrù R., Cao G. Comparison of reactive and non-reactive spark plasma sintering routes for the fabrication of monolithic and composite ultra high temperature ceramics (UHTC) materials. *Materials*, 2013, no. 6, pp. 1566-1583.
2. Щербаков В.А., Щербаков А.В., Бостанджиян С.А. //Физика горения и взрыва. 2019. №1. С. 83–91.

С.А. СЕРОПЯН, И.В. САЙКОВ

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им.
А. Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия*

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ РЕАКЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ Ni-Al И Ni-Al-ПТФЭ

Изучено влияние введения ПТФЭ в порошковую смесь Ni-Al на параметры горения и ударно-волнового инициирования. Установлено, что содержание 1 масс. % ПТФЭ повышает относительную плотность компактов и скорость горения. Установлены зависимости скорости горения от относительной плотности образцов и газовой среды. Содержание ПТФЭ от 5 масс. % повышает чувствительность к ударно-волновому инициированию.

S.A. SEROPYAN, I.V. SAIKOV

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of
Sciences, Chernogolovka, Russia*

IGNITION AND COMBUSTION OF Ni-Al AND Ni-Al-PTFE REACTION POWDER MIXTURES

In this study were analyzed the effect of the addition of PTFE in the Ni - Al powder mixture on the parameters of combustion and shock-wave initiation has been studied. It was found that the content of 1 mass. % PTFE increases the relative density and burning rate. The dependences of the combustion rate on the relative density of the samples and the gaseous medium have been established. The PTFE content is from 5 wt. % increases the sensitivity to shock wave initiation.

Реакционные материалы (РМ) – это многофункциональные энергетические композиты, состоящих из двух или более инертных компонентов, которые способны к интенсивной экзотермической реакции при сильном механическом или тепловом воздействии [1]. РМ применяются в военной и гражданской отраслях промышленности. Например, за счет фокусировки гетерогенной струи продуктов горения осуществляется резка и перфорация конструкционных материалов под водой и в условиях высоких давлений. Для повышения тепловыделения РМ используются металлы с высокой теплотой окисления, такие как алюминий, титан, магний и цирконий. Источником сильных окислителей выступают полигексафторпропилен (ПГФП), поливинилиденфторид (ПВДФ), политетрафторэтилен (ПТФЭ) и др. [2].

В настоящей работе исследовалось влияние добавки ПТФЭ на ударно-волновую инициируемость, температуру воспламенения, скорость и температуру горения реакционной порошковой смеси Ni-Al. По результатам термодинамических расчетов выбран стехиометрический состав Ni-Al из-за наибольшей адиабатической температуры горения 1638 °С. По расчетам

максимальная адиабатическая температура горения для смеси Ni–Al–ПТФЭ достигается при содержании ПТФЭ 60 масс. %, но получение из нее однородной смеси невозможно. Содержание ПТФЭ подбиралось опытным путем и варьировалось от 1 до 25 масс. % по формуле $(100-x)(\text{Ni}-\text{Al})+x\text{ПТФЭ}$. Измерения температуры воспламенения проводили по методике, представленной в работе [3]. Скорость горения измерялась в среде аргона и воздуха при давлении 0,1 МПа и в вакууме при 0,02 МПа с помощью термопар и видеосъемки на образцах в виде параллелепипедов размерами 5x5x20 мм и относительной плотностью 0,7–0,99. Исследование способности к ударно-волновому инициированию проводили по методике [4], предусматривающей метание стального ударника со скоростями 1 и 1,5 км/с.

Температура воспламенения порошковых компактов из смеси Ni–Al составляет порядка 660 °С, что соответствует температуре плавления алюминия, а максимальная температура горения при этом достигает 1600 °С. При содержании ПТФЭ от 1 до 10 масс. % в смеси Ni–Al снижается температура воспламенения на 20–50 °С, а максимальная температура горения не изменяется. Посредством рентгенофазового анализа установлено, что в синтезированных образцах из смеси Ni–Al–ПТФЭ обнаружен только монофазный продукт NiAl также, как и для образцов из смеси Ni–Al. Повышение относительной плотности компактов из смеси Ni–Al с 0,7 до 0,8 приводит к возрастанию скорости горения как на воздухе, так и в аргоне с 24 до 35 мм/с, а в вакууме с 18 до 24 мм/с. Максимальная скорость горения (до 120 мм/с) достигается с относительной плотностью 0,85–0,93 и при содержании ПТФЭ 1–3 масс. %. При повышении доли ПТФЭ до 25 масс. % скорость горения снижается до 5 мм/с. ПТФЭ повышает чувствительность РМ к ударно-волновому нагружению. Так, инициирование горения в образцах с 10 и более масс. % ПТФЭ происходит при скорости метания ударника 1 км/с, а в составах с 5 и более масс. % ПТФЭ – при 1,5 км/с.

Список литературы

1. Zhou Q., Hu Q., Wang B. and others// J. Alloys Compd. 2020. Vol. 832, P. 154894.
2. Valluri S.K., Schoenitz M., Dreizin E.L.// Defence Technol. 2019, Vol. 15, № 1, P. 1–22.
3. Vadchenko S. G., Boyarchenko O. D., Shkodich N. F. and others// Int. J. Self-Propag. High-Temp Synth. 2013, Vol. 22, № 1, P. 60–64.
4. Saikov I. V., Seropyan S. A., Saikova G. R. and others// Dokl. Phys. Chem. 2020, Vol. 492, № 1, P. 1–4.

Г.В. СИВЦОВА^{1,2}, С.В. САВУШКИНА^{1,2}, М.В. ГЕРАСИМОВ.³

¹ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, Россия,

²Московский авиационный институт, Москва, Россия

³Институт физической химии и электрохимии РАН, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ СПЛАВА Э110 С ДОБАВЛЕНИЕМ В ЭЛЕКТРОЛИТ СУБМИКРОННОГО ПОРОШКА ОКСИДА ИТТРИЯ

Керамикоподобные оксидные покрытия были получены методом микродугового оксидирования (МДО) на циркониевом сплаве Э110 (1%Nb) с добавкой субмикронного порошка оксида иттрия в электролит. Покрытия показали высокую коррозионную стойкость в результате электрохимических поляризационных исследований в 0.2M LiOH.

G. V. SIVTSOVA^{1,2}, S. V. SAVUSHKINA^{1,2}, M. V. GERASIMOV³

¹Keldysh Research Center, Moscow, Russia,

²Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

³Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russia

STUDY OF THE COATINGS OBTAINED BY MICRO-ARC OXIDATION OF E110 ALLOY IN ELECTROLYTE WITH ADDITION OF SUBMICRONIC YTTRIUM OXIDE POWDER

Ceramic-like oxide coatings were formed by micro-arc oxidation (MAO) on zirconium alloy E110 (1% Nb) with the addition of a submicron yttrium oxide powder into the electrolyte. The coatings showed high corrosion resistance in electrochemical polarization studies in 0.2M LiOH.

Одним из методов формирования защитных покрытий на цирконии и его сплавах является микродуговое оксидирование (МДО). Благодаря своим свойствам керамикоподобные МДО-покрытия перспективны для защиты конструкционных материалов ТВЭЛов от коррозии, ускоренного окисления при высокой температуре, охрупчивания и поглощения кислорода и водорода [1]. Также МДО-покрытия на основе диоксида циркония обладают теплозащитными свойствами [2, 3].

В данной работе были сформированы и исследованы керамикоподобные оксидные МДО-покрытия на циркониевом сплаве Э110. Покрытия получали в водном растворе гипофосфита натрия (5 г/л) и жидкого стекла (9 г/л) с добавкой субмикронного порошка оксида иттрия в количестве 6 г/л. МДО-обработка проводилась в течение 20 минут в анодно-катодном режиме с соотношением токов 1:1 и средней плотности тока 20, 30 и 40 А/дм².

Морфологию поверхности и поперечную структуру покрытий исследовали на растровом электронном микроскопе Quanta 600. Электрохимическое поведение покрытий исследовали в водном растворе 0,2М LiOH при температуре 25°C. Поляризация осуществлялась на потенциостате ПИ-50-1 в стандартной трехэлектродной ячейке из катодной области в анодную со скоростью 1 мВ/с.

Было выявлено, что при увеличении плотности тока МДО от 20 до 40 А/дм², толщина покрытий увеличивается от 15 до 30 мкм. Поверхность покрытий состоит из областей кратерной структуры с мелкими порами в центре и глобулярной структуры. Толщина барьерного слоя на границе со сплавом составляет ~ 1.5 мкм. Поляризационные исследования показали, что анодные токи на покрытиях на 1,5-2 порядка ниже, чем на сплаве без покрытия, а при увеличении потенциала до +600 мВ (х.с.э) уже на 4 порядка. Катодные токи на МДО покрытиях меньше на 3 порядка. Значения плотностей токов практически совпадают для покрытий, полученных при 20, 30 и 40 А/дм². Очень малые значения плотностей тока на анодных поляризационных кривых для МДО покрытий свидетельствуют о том, что металл с покрытием находится в глубоком пассивном состоянии и, следовательно, покрытия надёжно защищают основной металл.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (грант № МК 54.2019.8.).

Список литературы

1. ArunS., Arunnellaiappan T., Rameshbabu N. Fabrication of the nanoparticle incorporated PEO coating on commercially pure zirconium and its corrosion resistance// Surface and Coatings Technology. – 2016. V. 305. - P. 264-273
2. Savushkina S. V., Ashmarin A. A. , Apelfeld A. V. , Borisov A. M., Vinogradov A. V., Polyansky M.N., Bogdashkina N.L. Investigation of zirconia tetragonal phase coatings formed by plasma electrolytic oxidation// IOP Conf. Series:Journal of Physics: Conf. Series.- 2017. V. 857. – 012037
3. Borisov A.M., Savushkina S.V., Vinogradov A.V. , Tkachenko N.V., Vostrikov V.G., Romanovsky E.A., Polyansky M.N., Ashmarin A.A. Investigation of zirconia coatings obtained under plasma action in electrolytes// Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. - 2014.V. 8. No 2. - P. 338-342.

А.А. СИНЧЕНКО^{1,2}, П. МОНСО³

7. ¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

8. ² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

³ *Институт Нееля НЦНИ, Гренобль*

МАГНЕТОТРАНСПОРТ В $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$

Экспериментально исследовано магнитосопротивление квазиодномерного соединения с волной зарядовой плотности (ВЗП) $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ в диапазоне магнитных полей до 8 Т при температурах, ниже температуры пайерлсовского перехода. Показано, что переход в режим коллективного электронного транспорта ВЗП не сопровождается появлением отрицательного магнитосопротивления для ориентации магнитного поля как параллельно, так и перпендикулярно току ВЗП.

А.А. SINCHENKO^{1,2}, P. MONCEAU³

¹ *Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow*

² *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

³ *Institut NEEL, Grenoble, France*

MAGNETOTRANSPORT IN $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$

The magnetoresistance of a quasi-one-dimensional compound with a charge density wave (CDW) $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ has been studied experimentally in the range of magnetic fields up to 8 T at temperatures below the Peierls transition temperature. It was shown that the transition to the regime of collective electron transport of the CDW is not accompanied by the appearance of negative magnetoresistance for the orientation of the magnetic field both parallel and perpendicular to the CDW current.

Топологические материалы в настоящее время являются одними из наиболее интересных и интенсивно изучаемых объектов в физике твердого тела. Большой интерес представляют полуметаллы Вейля, транспортные свойства которых определяются безмассовыми фермионами Вейля. Одним из наиболее замечательных эффектов, возникающих в таких материалах, является киральная аномалия, которая проявляется в виде отрицательного продольного магнетосопротивления [1].

В недавно опубликованной работе [2] сообщалось о наблюдении в квазиодномерном проводнике с ВЗП $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ такого типа отрицательного магнитосопротивления в случае, когда магнитное поле прикладывалось параллельно цепочкам ВЗП. Зонные расчеты показывают, что данное соединение является полуметаллом Вейля в нормальном состоянии [3]. Однако, при понижении температуры и переходе в состояние с ВЗП пайерлсовская энергетическая щель полностью закрывает вейлевские конусы. В этой связи является удивительным, что эффект отрицательного магнитосопротивления

проявлялся в данном соединении, причем только в режиме движущейся ВЗП (скольжения) в электрических полях $E \approx 2-3 E_t$, где E_t является пороговым полем для начала скольжения ВЗП [4]. Магнитосопротивление в работе [2] возросло почти на порядок в магнитном поле 8 Т при $T=80$ К. На основании этих наблюдений был сделан вывод, что в $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ реализуется аксионная ВЗП – экзотическое состояние, когда ВЗП образована носителями, конденсированными с различных вейлевских конусов, а отрицательное магнитосопротивление является результатом транспорта аксионных поляритонов.

В настоящей работе проведены детальные исследования магнитосопротивления монокристаллов $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ в геометрии, полностью аналогичной экспериментальной геометрии работы [2] как в статическом состоянии ВЗП, так и в режиме ее скольжения. Показано, что в цитируемой работе корректно не реализуется коллективное движение волны зарядовой плотности. Полученные в данной работе электронные транспортные характеристики являются результатом гигантского джоулева нагрева, а эффект отрицательного магнитосопротивления является результатом сильной температурной неоднородности образцов. В режиме скольжения ВЗП как продольное, так и поперечное магнитосопротивление является положительным, квадратично зависит от магнитного поля и не превышает долей процента. Эффект отрицательного магнитосопротивления в данном соединении полностью отсутствует при всех состояниях волны зарядовой плотности и для всех ориентаций магнитного поля.

Список литературы

1. D.T. Son and B. Z. Spivak, Phys. Rev. B 88, 104412 (2013).
2. J. Gooth, et al, Nature 575, 315 (2019).
3. Shi, W. et al., arXiv:1909.04037.
4. P. Monceau, Advances in Physics 61, 325 (2012).

К.Л. СМИРНОВ

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ В РАЗРАБОТКЕ СИАЛОНОВОЙ КЕРАМИКИ

Экспериментально исследованы основные закономерности искрового плазменного спекания сиалоновой керамики по двум основным схемам. На этой основе для простого и реакционного спекания установлены: основные стадии процесса консолидации, зависимости относительной плотности, фазового состава, микроструктуры, прочностных свойств спеченной керамики от дисперсности порошкового сырья и максимальной температуры изотермической выдержки.

K.L. SMIRNOV

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

APPLICATION OF SPARK PLASMA SINTERING FOR THE DEVELOPMENT OF SIALON CERAMICS

The main regularities of spark plasma sintering of sialon ceramics are experimentally investigated according to two basic schemes. For simple and reaction sintering, the following are established: the main stages of the consolidation process, the dependences of the relative density, phase composition, microstructure, and strength properties of sintered ceramics on the dispersion of the powder raw materials and the holding temperature.

Искровое плазменное спекание (ИПС) – это недавно разработанный процесс, в котором нагрев спекаемого образца и используемой пресс-формы осуществляется за счет прямого пропускания через них импульсов постоянного электрического тока. По сравнению с обычным горячим прессованием ИПС позволяет существенно увеличить скорость нагрева и одновременно сократить время выдержки при максимальной температуре. Благодаря этому данный метод успешно используется для спекания различных материалов, в том числе, материалов со сложной структурой и составом: наноструктурных, функционально-градиентных и слоистых, неравновесных композитов, содержащих химически несовместимые компоненты [1]. Сиалоновая керамика характеризуется уникальным сочетанием высокой твердости, прочности и стойкости к износу, коррозии, термоудару, высокотемпературной ползучести. Это обуславливает перспективность ее широкого применения в различных областях техники, включая огнеупорные и конструкционные материалы для металлургии и химической промышленности, высокопрочный инструмент для металлообработки, подшипники, оснастка для сварки и др. [2]. В то же время

разработка методов спекания сиалоновой керамики является сложной материаловедческой задачей, так как требует учета целого ряда факторов, определяющих ее плотность, микроструктуру и фазовый состав [3].

При исследовании ИПС сиалоновой керамики использовались две разные схемы: простое спекание порошка $\beta\text{-Si}_5\text{AlON}_7$ и реакционное спекание смеси порошков $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ и $\beta\text{-Si}_2\text{Al}_4\text{O}_4\text{N}_4$. Все основные порошки для спекания были получены по оригинальным методикам самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, основанным на фильтрационном горении в азоте. В качестве активатора спекания использовался коммерческий порошок Y_2O_3 . При простом спекании мелкодисперсного порошка $\beta\text{-Si}_5\text{AlON}_7$ со средним размером зерна 0,6–1,0 мкм высокоплотная керамика с однородной мелкозернистой структурой была получена уже при максимальной температуре изотермической выдержки $T_{\text{max}} = 1450\text{--}1550^\circ\text{C}$ без применения активатора спекания. При использовании крупнодисперсного порошка $\beta\text{-Si}_5\text{AlON}_7$ со средним размером зерна 3,5–4,0 мкм спеченная керамика всегда имела достаточно высокий уровень пористости и подвергалась диссоциации при $T_{\text{max}} = 1750^\circ\text{C}$ и выше. Три характерных температурных интервала было выявлено при реакционном спекании сиалоновой керамики. При $T_{\text{max}} = 1600\text{--}1650^\circ\text{C}$ интенсивность усадки достигала значений, обеспечивающих получение керамики с плотностью близкой к теоретической. При этом не наблюдалось каких-либо фазовых трансформаций и изменений в размере/морфологии зерен исходных порошков. При $T_{\text{max}} = 1700\text{--}1750^\circ\text{C}$ исходный порошок $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ полностью переходил в β -сиалон, но без видимых изменений в размере/морфологии зерен. При T_{max} выше 1750°C спекание сопровождалось заметным ростом размера и изменением формы зерен. Предел прочности при изгибе ($\sigma_{\text{изг}}$) плотной крупнозернистой керамики в системе $\beta\text{-Si}_5\text{AlON}_7\text{--Y}_2\text{O}_3$ находился в пределах 200–250 МПа. Пористая крупнозернистая керамика из чистого $\beta\text{-Si}_5\text{AlON}_7$ имела заметно меньшие прочностные характеристики ($\sigma_{\text{изг}} = 120\text{--}150$ МПа). У сиалоновой керамики, полученной при использовании мелкодисперсных исходных порошков по обоим схемам спекания, $\sigma_{\text{изг}}$ мог достигать 450–600 МПа.

Список литературы

1. Guillon O., Gonzalez-Julian J., Dargatz B., Kessel T., Schierning G., Räthel J., Herrmann M. // Adv. Eng. Mater., 2014, Vol. 16, № 7, P. 830–849.
2. Ekström T. and Nygren M. // J. Am. Ceram. Soc., 1992, Vol. 75, № 2, P. 259–276.
3. Izhevskiy V.A., Genova L.A., Bressiani J.C., Aldinger F. // J. Eur. Ceram. Soc., 2000, Vol. 20, № 13, P. 2275–2295.

Н.Н. СОБОЛЕВА¹, А.К. СТЕПЧЕНКОВ², А.В. МАКАРОВ^{1,2}

¹*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

²*Институт физики металлов им. М.Н.Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТНОГО ОТЖИГА NiCrBSi ПОВЕРХНОСТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫДЕРЖКОЙ

Проведено инструментальное микроиндентирование для NiCrBSi покрытия, сформированного лазерной наплавкой, в наплавленном состоянии, а также после дополнительного высокотемпературного отжига при температуре 1025 °С. Показано, что значения ползучести при индентировании, для таких покрытий в сильной степени зависят от длительности выдержки в процессе индентирования.

N.N. SOBOLEVA^{1,2}, A.K. STEPCHENKOV², A.V. MAKAROV^{1,2}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*

²*M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE ANNEALING OF THE NiCrBSi COATING ON THE CHARACTERISTICS OBTAINED BY MICROINDENTATION WITH DIFFERENT EXPOSURE TIMES

Instrumental microindentation was performed for the NiCrBSi laser clad coating in the deposited state, as well as after additional high-temperature annealing at a temperature of 1025 °C. It is shown that the values of creep during indentation for such coatings strongly depend on the duration of exposure during indentation.

NiCrBSi покрытия применяются в деталях, подвергающихся воздействию коррозии, износа и повышенных температур [1]. Они могут наноситься на поверхность деталей разными способами наплавки и напыления, при этом в литературе отмечаются улучшенные эксплуатационные свойства NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой, по сравнению с покрытиями, полученными другими способами [2,3].

Ранее авторами доклада впервые было предложено использование высокотемпературного отжига NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой [4-8]. Отжиг при температурах 1000-1075 °С способствовал формированию в структуре крупных карбидов и боридов, значительно повышающих абразивную износостойкость покрытий, при этом максимальными значениями износостойкости характеризовались покрытия после замедленного отжига в вакууме [5,7].

Одно из направлений исследований хромоникелевых сплавов связано с оценкой их микромеханических свойств (прочностных и упругих характеристик) современными методами микроиндентирования [9,10], основанными на непрерывной регистрации диаграммы нагружения и разгрузки в координатах «нагрузка – перемещение индентора».

В работе для NiCrBSi-покрытия, сформированного лазерной наплавкой, в наплавленном состоянии, а также после дополнительного высокотемпературного отжига при температуре 1025 °С в вакуумной печи проводилось инструментальное микроиндентирование согласно стандарту ISO 14577. Нагрузка на индентор составляла 1,960 Н, время нагружки и разгрузки – 5 с. Продолжительность выдержки варьировалась от 0 до 60 с.

Показано, что наиболее чувствительным к изменению длительности выдержки параметром является ползучесть при индентировании C_{IT} . Ее значения при различной продолжительности выдержки отличаются до 4-х раз. При этом максимальной ползучестью характеризуются покрытия, длительность выдержки при индентировании которых составила 20 с. Таким образом, сравнение этого показателя для покрытий в различном состоянии возможно проводить только при одинаковых условиях проведения инструментального индентирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00031). Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Список литературы

1. FernándezE., CadenasM., GonzálezR., et al. // Wear. 2005. Vol. 259. P. 870–875.
2. Gómez-del Río T., Garrido M.A., Fernández J.E., et al. J. Mater. Proc. Techn., 2008. Vol. 204. Is. 1-3. P. 304–312.
3. Xu G., Kutsuna M., Liu Z., Zhang H. // Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 417. P. 63–72.
4. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. // Патент № 2492980 РФ. Оpubл. в БИМП. 2013. № 26.
5. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. // МнТОМ. 2015. № 3. С. 39–46.
6. Makarov A. V., Soboleva N. N., Gibzun M. S., et al. // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2053. No. 030037. 5 p.
7. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Kharanzhevskiy E.V. // J. Cryst. Growth. 2019. Vol. 525. 125200. 5 p.
8. ГибзунМ.С., МакаровА.В., СоболеваН.Н., МалыгинаИ.Ю. // Master's journal. 2017. № 1. С. 11–16.
9. Xuan H.-F., Wang Q.-Y., Bai S.-L., et al. // Surf. Coat. Technol. 2014. Vol. 244. P. 203–209.
10. Houdková Š., Smazalová E., Vostřák M., Schubert J. // Surf. Coat. Technol. 2014. Vol. 253. P. 14–26.

А.А. СОЛОВЬЕВ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, О.В. РУБИНКОВСКАЯ,
Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ

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

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СЛОЕВ
a-MoS_x ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФОТО-АКТИВИРОВАННОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ВОДЫ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ a-MoS_x/WO₃**

Данная работа посвящена формированию методом импульсного лазерного осаждения и изучению нано-гетероструктур a-MoS_x/WO₃ для активирования фотоэлектрохимической реакции расщепления воды и получения водорода. Выявлены стехиометрические, структурно-фазовые и морфологические особенности аморфных MoS_x и нанокристаллических WO₃ пленок. Приведены результаты исследований энергетических зон и фотоэлектрохимической активности структур a-MoS_x/WO₃/FTO.

A. SOLOVIEV, D.V. FOMINSKI, O.V. RUBINKOVSKAYA,
R.I. ROMANOV, V.YU. FOMINSKI

¹*National Research Nuclear University MEPhI, Russia*

**REGULATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF
a-MoS_x LAYERS FOR INCREASING THE EFFICIENCY
OF PHOTO-ACTIVATED WATER SPLITTING BY
a-MoS_x/WO₃ HETEROSTRUCTURE**

This work is devoted to the preparation of a-MoS_x/WO₃ nano-geterostructures by pulsed laser deposition and their study for the activation of photoelectrochemical reaction of water splitting for hydrogen production. Stoichiometric, structural-phase and morphological features of amorphous MoS_x and nano-crystalline WO₃ are revealed. The results energy bands and photoelectrochemical activity of MoS_x/WO₃/FTO structures studies are presented.

Фото- и электрокаталитический метод расщепления воды является наиболее чистым способом получения водорода – источника «зеленой» энергетики. Однако, для рентабельности данного метода необходим поиск новых наноструктурированных катализаторов. Гетероструктуры, состоящие из оксидов и халькогенидов переходных металлов, таких как сульфид молибдена и оксид вольфрама, являются хорошей альтернативой дорогостоящим катализаторам металлов платиновой группы.

В работе установлено, что одним из ключевых факторов фотоэлектрохимической активности структур MoS_x/WO₃/FTO является стехиометрическое соотношение $x=S/Mo$. Вариация концентрации серы в пленки MoS_x достигалась путем изменения давления H₂S (от 9 до 54 Па) в камере в

процессе лазерной абляции мишени Mo. Результаты хроноамперометрических измерений (рис.1а) при приложенном положительном потенциале ~ 0 В, проведенные во время освещения/ без освещения Хе лампой с мощностью светового потока ~ 100 мВт/см² показали, что при соотношении $x=4,5$ достигается максимальная плотность тока, равная -1 мА/см². Исследования методом комбинационного рассеяния света (рис.1б) показали, что пленка MoS_{4.5} имеет аморфную структуру, однако наблюдаются локальное упорядочение атомной упаковки, о чем свидетельствует появление узких пиков с частотами ~ 200 см⁻¹, ~ 320 см⁻¹, ~ 450 см⁻¹, ~ 520 см⁻¹, 540 см⁻¹. Измерения СЭМ показали, что реактивное осаждение MoS_x на пористый WO₃ приводит к формированию морфологии типа “цветная капуста” (рис1.в). Толщина слоев а-MoS_x и WO₃ составляла ~ 100 нм.

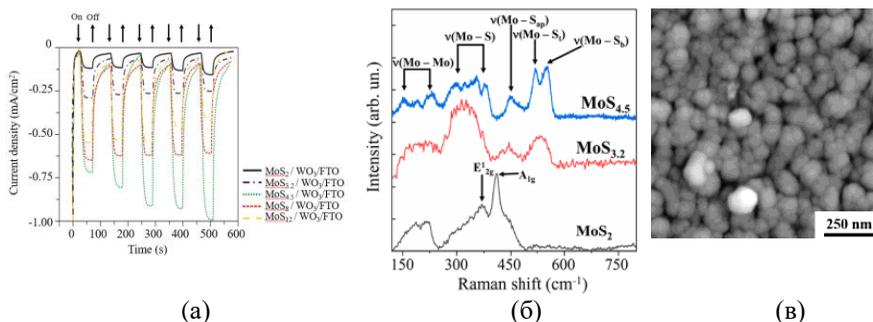


Рис. 1. (а) Хроноамперометрические измерения в растворе 0,5 М H₂SO₄ структур MoS_x/WO₃/FTO с соотношением S/Mo равным 2; 3,2; 4,5; 8; 12, проведенные во время освещения/ без освещения Хе лампой; (б) и спектры комбинационного рассеяния света пленок MoS₂, MoS_{3.2}, MoS_{4.5}; (в) морфология поверхности созданной гетероструктуры.

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

В.Г. СРЕДИН, А.П. МЕЛЕХОВ, Р.Ш. РАМАКОТИ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МЕХАНИЗМ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В CdHgTe ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Обсуждается микроскопическая модель генерации точечных дефектов под действием мягкого рентгеновского излучения в твердом растворе Cd_xHg_{1-x}Te

V.G. SREDIN, A.P. MELEKHOV, R.S. RAMAKOTI

National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

DEFECT FORMATION MECHANISM IN CdHgTe UNDER THE SOFT X-RAY RADIATION ACTION

A microscopic model of the point defects generation under the action of soft X-ray radiation in Cd_xHg_{1-x}Te solid solution is discussed

Генерация дефектов в полупроводниках под действием рентгеновского излучения (РИ) связывается с релаксацией электронных возбуждений, вызванных ионизацией РИ внутренних оболочек ионов кристаллической решетки [1,2]. В этой модели возникновение точечного дефекта связывается с появлением «выделенной группы ионов» (ВГИ) – локального скопления ионов одинакового знака с дополнительно ионизированной внутренней оболочкой, кулоновское поле которых инициирует смещение атома из узла кристаллической решетки.

Ранее нами было обнаружено, что при облучении монокристаллов и эпитаксиальных слоев Cd_xHg_{1-x}Te с составами 0.2 < x < 0.3 мягким РИ (МРИ) лазерной плазмы с энергией кванта до 600 эВ в приповерхностной области материала, сопоставимой с глубиной проникновения МРИ, возникают дефекты структуры, влияющие на физические свойства полупроводника [3]. Было обнаружено также, что процесс облучения сопровождается внешним фотоэффектом, связанным с интенсивной эмиссией фото-, Оже- и вторичных электронов [3]. Оценки, основанные на измерении фототока, показывают, что за время действия импульса МРИ (20нс) в приповерхностной области материала возможна генерация электрического поля с амплитудным значением напряженности 10⁸ В/м, которое может осуществлять функцию ВГИ в формировании выталкивающей ион силы.

Поглощение МРИ в условиях наших экспериментов приводит к почти резонансному возбуждению ионов Hg [3,4]. Будем считать, что глубина потенциальной ямы, создаваемой анионами ближайшего окружения для катиона Hg, соответствует энергии его связи, при сообщении которой он может покинуть регулярный узел с образованием точечного дефекта. Рассчитанные в [5]

значения энергии потенциальных минимумов в $\text{Cd}_{0.25}\text{Hg}_{0.75}\text{Te}$ составляет 0.944эВ для связи $\text{Cd}-\text{Te}$ и 0.048эВ для $\text{Hg}-\text{Te}$. Дополнительное возмущение, действующее на ион Hg , возникающее за счет наведенного поля, можно грубо оценить как $\Delta V = \Delta q E \Delta x \sim 1.5 \times 10^{-2} \text{эВ}$ (здесь $\Delta q = 3e$ – заряд дополнительно ионизированного МРИ иона Hg , $E = 10^8 \text{В/м}$ – напряженность наведенного поля, Δx – смещение иона от положения равновесия).

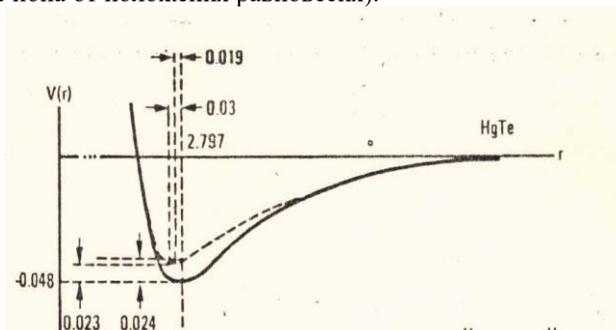


Рис. 1. Вид потенциала для связи $\text{Hg}-\text{Te}$ в решетке $\text{Cd}_{0.25}\text{Hg}_{0.75}\text{Te}$ [5]

Штриховой линией на рисунке показано изменение потенциала при смещении иона Hg относительно положения равновесия за счет теплового движения (колебаний решетки). Как следует из рисунка, вследствие теплового движения глубина потенциальной ямы может уменьшиться вплоть до значения 0.024эВ , что сопоставимо по величине с ΔV . Таким образом, действие наведенного за счет внешнего фотоэффекта поля оказывается достаточным для образования точечного дефекта в кристаллической решетке при наличии в ней дополнительно ионизированного МРИ иона. (Дополнительная ионизация может быть связана с любым типом излучения способным вызвать фотоэффект в материале, например, ультрафиолетовым излучением). Отметим, что предложенный нами механизм дефектообразования, учитывающий вклад поля, наведенного внешним фотоэффектом в полупроводнике, ранее не рассматривался.

Список литературы

1. Клиnger Ж.И., Пущин Ч.В., Машовец Т.В. и др // УФН. 1985. Т. 147. № 3. С. 523.
2. Вавилов В. С. // УФН. 1997. Т. 167. № 4. С. 407.
3. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Ананьин О.Б., Мелехов А.П., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 54-60.
4. Sredin V.G., Lanskaya O.G., Popovnin V.M. // Semiconductors. 1996. Т. 30. № 3. С. 215-216.
5. Sher A., Chen A., Spicer W. E., Shin C.-K. // J. Vac. Sci. Technol. 1985. A3, No 3. P. 105.5.

У.С. СТАРИКОВА¹, Н.Н. СОБОЛЕВА², А.В. МАКАРОВ^{1,2},
Е.В. ХАРАНЖЕВСКИЙ³

¹*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

²*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

³*Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия*

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА NiCrBSi–B₄C ПОКРЫТИЯ

В работе обсуждены возможности упрочнения и повышения износостойкости NiCrBSi покрытий. Исследовано влияние отжига при температуре 1075 °С на структуру и свойства NiCrBSi–B₄C покрытия, сформированного с использованием лазерного излучения. Показано формирование при такой термической обработке в структуре покрытия боридов хрома.

U.S. STARIKOVA¹, N.N. SOBOLEVA², A.V. MAKAROV^{1,2},
E.V. KHARANZHEVSKY³

¹*M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia*

²*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia*

³*Udmurt State University, Izhevsk, Russia*

EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE ANNEALING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE NiCrBSi–B₄C COATING

The paper discusses the possibilities of hardening and increasing the wear resistance of NiCrBSi coatings. The effect of annealing at 1075 °C on the structure and properties of the NiCrBSi–B₄C laser clad coating has been studied. Owing to the heat treatment, chromium borides are formed in the structure of the coating.

NiCrBSi покрытия наносятся на поверхность деталей газовых турбин, поршневых штоков и других деталей, так как позволяют защитить поверхность изделий от коррозии, эрозии, износа и окисления при высоких температурах [1-5]. К NiCrBSi порошкам при формировании покрытий могут быть добавлены упрочняющие частицы, например, такие как борид TiB₂, карбиды WC, TiC, Cr₃C₂, оксиды Al₂O₃, V₂O₅ и т.д. Карбиды бора B₄C также могут быть использованы в качестве упрочняющих частиц при формировании покрытий, так как имеют высокую твердость, термодинамическую устойчивость и высокие показатели износостойкости [6].

В литературе имеются сведения о формировании NiCrBSi–B₄C покрытий. Так, например, в работах [7-9] при лазерной наплавке на основу Ti-6Al-4V к

порошку NiCrBSi добавляли 2, 5 и 10 масс. % V_4C_5 , а в работе [1] были нанесены порошки, содержащие NiCrBSi и V_4C_5 (5 об.% и 12 об.%), методом селективного лазерного плавления на основу из 12X18H10T.

В работах [10–13] для повышения абразивной износостойкости NiCrBSi покрытий проводился высокотемпературный отжиг. Это способствовало формированию крупных карбидов и боридов хрома. Однако для NiCrBSi покрытий с содержанием карбида бора V_4C_5 влияние термической обработки на структуру и износостойкость остаётся малоизученным.

Поэтому целью работы явилось исследование влияния отжига при температуре 1075 °C на структуру и микромеханические свойства NiCrBSi– V_4C_5 покрытия, сформированного высокоскоростным лазерным плавлением. Показано, что в результате отжига формируются крупные бориды хрома, отсутствовавшие в структуре наплавленного покрытия.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020190116-6. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Список литературы

1. Golyshev A.A., Filippov A.A.//Nanoscience and Technology. 2020. Vol. 11, P. 247–257.
2. Zhang D.-w., Lei T.C., Zhang J.-g., Ouyang J.-h.// Surf. Coat. Technol. 1999.Vol. 115,P. 176–183.
3. Navas C., Colaco R., Damborenea J. De, Vilar R.// Surf. Coat. Technol. 2006. Vol. 200, P. 6854–6862.
4. Guo Ch., Zhou J., Chen J., et al. // Wear. 2011. Vol. 270,P. 492–498.
5. Guo Ch., Chen J., Zhou J., et al. // Surf. Coat. Technol.2012. Vol. 206, P. 2064–2071.
6. Пилянкевич А.Н. Боракарбиды // Химическаяэнциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. И.Л. Кнунянц. – М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1: АДарзана. С. 300. 623 с.
7. FanX., GengL., XuB., LiJ. // Adv. Mater. Res. 2009. Vol. 79-82. P. 473–476.
8. Meng Q.W., Geng L., Zhang B.Y. // Surf. Coat. Technol. 2006. Vol. 200. P. 4923–4928.
9. Geng L., Meng Q., Chen Y. // Key Eng. Mater.2006. Vol. 313. P. 139–144.
10. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. // Патент № 2492980 РФ. Оpubл. в БИМП. 2013. № 26.
11. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. // МиТОМ. 2015. № 3. С. 39–46.
12. Makarov A. V., Soboleva N. N., Gibzun M. S., et al. // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2053. No. 030037. 5 p.
13. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Kharanzhevskiy E.V. // J. Cryst. Growth. 2019. Vol. 525. 125200. 5 p.

**А.С. СТАРИКОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ, И.В. АНИЩЕНКО,
С.В. ПОКРОВСКИЙ, Д.А. АБИН, И.А. РУДНЕВ**

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЛАТЕРАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕВИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СТОПКИ ВТСП-ЛЕНТ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Представлены новые результаты исследования влияния температуры на силу левитации и возвращающую силу стопок ВТСП-лент, содержащих от 10 до 50 лент размерами 12 мм × 12 мм. Получены экспериментальные данные по влиянию толщины стопок и температуры на их латеральную устойчивость при боковых смещениях относительно положения магнита.

**A.S. STARIKOVSKII, M.A. OSIPOV, I.V. ANISCHENKO,
S.V. POKROVSKII, D.A. ABIN, I.A. RUDNEV**

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

LATERAL STABILITY OF A LEVITATION SYSTEM BASED ON A HTS TAPE STACK IN A WIDE RANGE OF TEMPERATURES

New results of investigating the effect of temperature on the levitation force and the restoring force of HTS tape stacks containing from 10 to 50 tapes with dimensions of 12 mm × 12 mm are presented. Experimental data on the effect of the thickness of the stacks and temperature on their lateral stability at lateral displacements relative to the position of the magnet are obtained.

Для разработки левитационных подшипников и транспортных систем на основе ВТСП лент с покрытием важно знать не только информацию о силе левитации при вертикальном смещении, но и данные об устойчивости системы при боковых смещениях сверхпроводника относительно постоянных магнитов, а также о влиянии температуры на латеральную устойчивость системы. В данной работе мы представляем новые экспериментальные результаты по исследованию влияния температуры на силу левитации и возвращающую силу стопок ВТСП-лент, подвергающихся циклическим боковым смещениям относительно положения постоянного магнита.

Для измерений использовалась имеющаяся в продаже ВТСП-лента шириной 12 мм производства SuperOx. Ленты были порезаны на квадраты 12x12 мм и сложены в стопки толщиной в 10, 30 и 50 лент. Измерения проводились как в режиме охлаждения в нулевом поле (режим ZFC), так и в режиме охлаждения в поле (режим FC). Образец охлаждался при помощи криокулера на вертикальном расстоянии 80 мм от магнитной сборки в случае охлаждения в режиме ZFC и на

расстоянии 8,5 мм в случае охлаждения в поле. Затем в обоих случаях тензодатчик с магнитами перемещался вниз в конечное положение на расстояние 7,5 мм до стопки. После этого производились его циклические латеральные перемещения над закрепленной в держателе стопкой. Одновременно с этим производились измерения вертикальной и латеральной составляющих силы взаимодействия между стопкой ВТСП-лент и сборкой магнитов. Измерения проводились при различных температурах сверхпроводника в диапазоне 33 - 77.4 К. Схематическое изображение установки представлено на рис. 1.

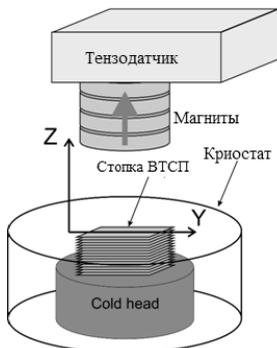


Рис.1. Схематическое изображение экспериментальной установки.

Полученные экспериментальные результаты позволяют заключить, что как сила левитации, так и латеральная возвращающая сила уменьшаются при увеличении температуры. Заметен четкий гистерезис вертикальной и горизонтальной составляющих силы левитации, который уменьшается с ростом числа элементов в стопке, и заметно увеличивается с повышением температуры, вплоть до 77.4 К как для ZFC, так и для FC режимов.

Было проведено численное моделирование силы левитации и возвращающей силы методом конечных элементов в среде моделирования ComsolMultiphysics. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта 17-19-01527.

А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, Е.А. ЛЕВАШОВ

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Ta-Si-N

В работе методом импульсного магнетронного распыления были получены покрытия Ta-Si-N при частоте импульсов 5, 50 и 350 кГц. Изучены структура, механические свойства и стойкость покрытий к окислению при 1200 °С. Был определен оптимальный режим осаждения с точки зрения обеспечения совокупности высоких механических характеристик и жаростойкости.

A.D. SYTCHENKO, PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV,
E.A. LEVASHOV

NUST «MISiS», Moscow, Russia

INFLUENCE OF PULSE FREQUENCY ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ta-Si-N COATINGS

In this work, the Ta-Si-N coatings were deposited by the pulsed magnetron sputtering at a pulse frequency of 5, 50, and 350 kHz. The structure, mechanical properties, and oxidation resistance of the coatings at 1200 °C were studied. The optimal deposition mode was determined from the point of view of providing a combination of high mechanical characteristics and oxidation resistance.

Ta-Si-N представляет большой интерес для практического применения в качестве диффузионно-барьерных, термически стабильных и жаростойких покрытий [1,2]. Наиболее распространенным способом получения покрытий Ta-Si-N является магнетронное напыление, обладающее неоспоримыми преимуществами, такими как универсальность метода, однородность получаемых покрытий, низкая концентрация дефектов и др. Отметим, что эксплуатационные характеристики магнетронных покрытий могут быть существенно повышены за счёт осаждения в импульсном режиме (PMS, pulsed magnetron sputtering), использование которого приводит к измельчению зерна, снижению уровня шероховатости покрытий, повышению твердости, адгезионной прочности, износо- и коррозионной стойкости [4,5].

Целью данной работы является исследование влияния частоты импульсов при магнетронном напылении на структурные характеристики, механические свойства и жаростойкость покрытий в системе Ta-Si-N.

Магнетронное распыление мишени TaSi₂ проводилось в режиме импульсного тока при соотношении расходов газов Ar/N₂=0,5 на установке УВН-2М при следующих параметрах: ток 2 А, напряжение 500 В, остаточное и рабочее

давление 0,005 и 0,2 Па соответственно. Источник питания Pinnacle Plus поддерживал мощность магнетрона на уровне 1 кВт, при этом частота составляла 5, 50 и 350 кГц. В качестве подложек использовались пластины из монокристаллического Si (100).

Микроструктура и элементный состав покрытий оценивались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi S-3400 с приставкой Noran 7 Thermo для энергодисперсионного анализа (ЭДС). Рентгеноструктурный анализ (РФА) проводили на дифрактометре D2 Phaser Bruker с CuK α излучением. Механические характеристики были измерены с помощью прибора Nano Hardness Tester при нагрузке 4 мН. Изотермические отжиги покрытий проводились на воздухе в муфельной печи SNOL 3.3.2/1200 при 1200 °С с выдержкой в течение 60 мин. Отожженные образцы были исследованы методами СЭМ, ЭДС и РФА.

Результаты СЭМ и РФА показали, что покрытия характеризовались плотной однородной структурой и являлись рентгеноаморфными. Наблюдалось снижение толщины и скорости роста покрытий с увеличением частоты от 5 до 350 кГц. Образцы, осажденные при 5 и 50 кГц, показали высокие твердость 23-24 ГПа и упругое восстановление 75-77%. Увеличение частоты до 350 кГц привело к падению твердости и упругого восстановления на ~38% и ~14% соответственно. Отжиги показали, что на поверхности покрытий формировался оксидный слой на основе SiO $_2$, Ta $_2$ O $_5$, TaO $_2$. Наблюдалась выраженная кристаллизация фазы TaSi $_2$, что подтверждается данными РФА. Образцы, осажденные при 5 и 50 кГц, показали небольшую толщину оксидного слоя 0,9 и 1,1 мкм, что говорит о хорошей жаростойкости покрытий при температуре 1200 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No 19-19-00117).

Список литературы

1. C.K. Chung, T.S. Chen // Microelectron. Eng. Vol. 87. 2010. P. 129–134
2. P. Zeman, J. Musil, R. Daniel // Surf. Coat. Technol. Vol. 200. 2006. P. 4091–4096.
3. Ph.V. Kiryukhantsev-Korneev, A.D. Sytchenko, A.Yu. Potanin and others // Surf. Coat. Technol. Vol. 403. 2020. 126373.
4. I. Iordanova, P.J. Kelly, M. Burova and others // Thin Solid Films. Vol. 520. 2012. P. 5333–5339.

А.Д. СЫТЧЕНКО¹, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ¹, П.А. ЛОГИНОВ¹,
В.В. КЛЕЧКОВСКАЯ², Е.А. ЛЕВАШОВ¹

¹Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС», Москва,
Россия

² Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ Ta-Zr-Si-B-C-N ОТ РАСХОДОВ РЕАКЦИОННЫХ ГАЗОВ N₂ И C₂H₄

Покрyтия Ta-Zr-Si-B были получены методом магнетронного распыления в режиме постоянного тока в средах Ar, Ar-N₂ и Ar-C₂H₄ при варьировании расходов газов. Исследована структура и определены механические и триботехнические характеристики, термическая стабильность и жаростойкость покрытий при 1000 °С. Также проведены In-situ исследования структурно-фазовых превращений непосредственно в колонне просвечивающего электронного микроскопа.

A.D. SYTCHENKO¹, PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV¹,
P.A. LOGINOV¹, V.V. KLECHKOVSKAYA², E.A. LEVASHOV¹

¹National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia

² Shubnikov Institute of Crystallography RAS, Moscow, Russia

DEPENDENCE OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ta-Zr-Si-B-C-N COATINGS ON THE FLOW RATE OF N₂ AND C₂H₄ REACTION GASES

The Ta-Zr-Si-B coatings were deposited by the DCMS method in Ar, Ar-N₂ and Ar-C₂H₄ with different gas flow rates. The structure, mechanical and tribotechnical characteristics, thermal stability, and oxidation resistance at 1000 °C of coatings were determined. In-situ studies of structural-phase transformations were also carried out directly in the column of a transmission electron microscope.

Целью настоящей работы являлось сравнительное исследование структуры и свойств твердых жаростойких покрытий Ta-Zr-Si-B, полученных при магнетронном распылении в средах Ar, Ar-xN₂ и Ar-xC₂H₄, где x = 0, 5, 10 см³.

Покрyтия были нанесены с помощью метода магнетронного распыления мишени TaZrSiB (70,8% Ta, 18,6%Si, 7,4 %Zr, 2,9%B) при постоянном токе в среде рабочего газа Ar, а также его смесях с N₂ и C₂H₄. Расход контролировался системой газонапуска Элточприбор. В качестве модельных подложек использовались пластины из Al₂O₃ и Ti-сплав. Мощность на магнетроне поддерживалось 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 растровой электронной микроскопии (РЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгенофазового анализа (РФА). Механические свойства определялись методом наноиндентирования при нагрузке 4 мН. Трибологические испытания покрытий проводились по схеме «стержень-диск» с использованием контр-тел из Al_2O_3 и стали 100Cr6 при нагрузке 1 Н. Дорожки износа исследовались методом оптической профилометрии. Для оценки жаростойкости покрытий проводились ступенчатые отжиги на воздухе при $T=1000\text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $200\text{ }^\circ\text{C}$ и выдержкой в течение 1 ч. До и после отжигов покрытия были исследованы весовым методом и методами РЭМ и ЭДС. Были изучены структурно-фазовые превращения в покрытиях при нагреве в колонне ПЭМ.

Согласно данным РЭМ и ПЭМ, нереакционное покрытие имело колонную структуру (фаза h-TaSi₂), в то время как реакционные образцы обладали плотной аморфной структурой. Было установлено, что наибольшей твёрдостью до 29 ГПа и упругим восстановлением до 78 %, обладали реакционные покрытия, содержащие от 30 до 40 ат.% N или C соответственно. Покрытия с высоким содержанием C продемонстрировали низкий коэффициент трения ~0.2 и высокую износостойкость при трении в паре с шариком 100Cr6. Все покрытия обладали высокой жаростойкостью до $1000\text{ }^\circ\text{C}$, что обусловлено формированием на их поверхности защитного слоя Ta₂O₅-SiO₂. Реакционные покрытия успешно сопротивлялись термоциклированию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект 0718-2020-0034).

Список литературы

1. C.K. Chung, T.S. Chen // *Microelectron. Eng.* Vol. 87(2). 2020. P. 129-134.
2. J.-S. Fang, W.-J. Su, M.-S. Huang, and others // *J. Electron. Mater.* Vol. 43. 2014. P. 212–218.

А.К. ТАШАТОВ, Н.М. МУСТАФОВЕВА, Р.Р. ХУДАЯРОВ,
А.Р. ТУРСУНОВ

Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

ВЛИЯНИЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ ТОНКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ

В данной работе проведены сравнительные исследования влияния бомбардировки ионами Ar^+ и Ni^+ на состав, структуру и коэффициент прохождения света монокристаллического Si. В обоих случаях имплантация приводит к разупорядочению поверхностных слоев и уменьшению K . После прогрева при $T = 900$ K Si, имплантированного ионами Ni^+ , в поверхностной области Si в зависимости от дозы ионов формируются эпитаксиальные фазы (при $D < 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и пленки (при $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) $NiSi_2$.

A.K. TASHATOV, N.M. MUSTAFOEVA, R.R. XUDAYAROV,
A.R. TURSUNOV

Karshi State University, Karshi, Uzbekistan

INFLUENCE OF DISORDERING OF THIN SURFACE LAYERS ON THE OPTICAL PROPERTIES OF SILICON

In this work, comparative studies of the effect of bombardment with Ar^+ and Ni^+ ions on the composition, structure, and light transmission coefficient of single-crystal Si are carried out. In both cases, implantation leads to disordering of the surface layers and a decrease in K . After heating at $T = 900$ K Si implanted with Ni^+ ions, epitaxial phases are formed in the surface region of Si, depending on the ion dose (at $D < 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) and films (at $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) $NiSi_2$.

Показано, что ширина запрещенной зоны E_g наноразмерных фаз типа $MeSi_2/Si$ и $GaMeAs$ заметно больше, чем E_g массивных пленок $MeSi_2$ и $GaMeAs$. Оценены размеры наноструктур при которых начинают проявляться квантово-размерные эффекты. В настоящее время большое внимание уделяется изучению оптических и электронных свойств полупроводников с наночастицами и нанопленками на поверхностных слоях. Особый интерес представляют исследования, связанные с изменением свойств кремния при уменьшении его размеров до нескольких нанометров, а также исследования, направленные на изменения свойств нанопленок Si при различных воздействиях (адсорбция атомов, ионная и электронная бомбардировка, окисление).

Разупорядочение приповерхностного слоя Si (111) приводит к уменьшению коэффициента пропускания света K во всей исследуемой области энергии фотонов ($h\nu = 0.4 - 1.5$ эВ).

Ионная бомбардировка приводит к заметному уменьшению коэффициента поглощения во всей исследуемой области $h\nu$, увеличению экспоненциального участка и, следовательно, уменьшению крутизны линейного участка кривой $I(h\nu)$. Эти изменения происходят до дозы $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, которой соответствует полной аморфизации приповерхностного слоя.

Учитывая то, что для монокристаллических и аморфных пленок кремния коэффициенты отражения света в исследуемой области $h\nu$ мало отличаются друг от друга и его значение не превышает 4 – 6 % можно полагать, что для этих пленок зависимости $K(h\nu)$ и $\alpha(h\nu)$ обратно пропорциональны. Поэтому по крутизне линейных участков кривых $K(h\nu)$ можно оценить степень разупорядочения поверхности. При этом в отличие от $\alpha(h\nu)$ крутизны кривых $K(h\nu)$ определены относительно оси $K = 100\%$. Видно, что с ростом дозы ионов значение β , соответственно крутизна кривых $\text{tg}\beta$ уменьшается, а значение $E_0 \sim \frac{1}{\text{tg}\beta}$ – увеличивается, что приводит к росту поглощения света и уменьшению интенсивности проходящего света [1]. Отметим, что при ионной бомбардировке независимо от дозы ионов значение $h\nu$ при котором K уменьшается примерно до нуля не изменяется и лежит в пределах 1.1 – 1.15 эВ, т.е. при аморфизации не происходит уменьшения ширины запрещенной зоны. Наши дальнейшие исследования показали, что E_g для аморфизированного слоя Si составляет ~ 1.2 эВ.

Впервые определена толщина аморфизированных слоев, степень разупорядочения поверхности и степень покрытия поверхности аморфизированными фазами Si (111), бомбардированного ионами низких энергий ($E_0 = 0.5 - 2$ кэВ).

Список литературы

1. П.Г. Петросян, Л.Н. Григорян. ЖТФ, 87(3), 443 (2017).

Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, М.Б. ЮСУПЖОНОВА,
Д.А. МИРЗАЕВ, Ш. ХАШИМОВ

*Ташкентский Государственный Технический Университет, 100095 Ташкент,
Узбекистан*

ВЛИЯНИЯ АДСОРБЦИИ АТОМОВ Ва НА СОСТАВ МОНОКРИСТАЛЛОВ CdS

Изучен состав монокристаллов CdS с поверхностной пленкой Ва толщиной θ от 0.5 до 5 монослоев. Показано, что при комнатной температуре не происходит заметной взаимодиффузии атомов на границе Ва-CdS. После прогрева при $T=700$ К происходит интенсивная диффузия S в пленку Ва и образуется соединение типа Ва₂S.

D.A. TASHMUKHAMEDOVA, M.B. YUSUPJONOVA,
D.A. MIRZAEV, SH. XASHIMOV

Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095 Uzbekistan

EFFECTS OF ADSORPTION OF Ba ATOMS TO THE COMPOSITIONS OF CdS SINGLE CRYSTALS

The composition of CdS single crystals with a Ba surface film with a thickness of 0.5 to 5 monolayers have been studied. It is shown that at room temperature there is no noticeable interdiffusion of atoms at the Ba-CdS interface. After heating at $T = 700$ K, intense diffusion of S occurs into the Ba film and a compound of the Ba₂S type is formed.

В настоящее время хорошо изучено влияние термообработки, лазерного отжига, СВЧ-обработок, ионной и электронной бомбардировки, на структуру, состав и оптические свойства образцов A^2B^6 , а также процессы взаимодиффузии атомов на границе раздела многослойных систем созданных на основе этих полупроводников [1,2]. До настоящего времени отсутствуют достоверные сведения об изменении состава, структуры и свойств A^2B^6 с поверхностной пленкой активных металлов разной толщины. В данной работе впервые изучено влияние адсорбции атомов Ва с толщиной от 0.5 до 5 монослоев на состав монокристалла CdS (111). На рис. 1. приведены зависимости интенсивности оже-пиков Ва, S и Cd от глубины d для CdS с пленкой Ва толщиной ~ 15 Å. Видно, что при комнатной температуре на границе Ва-CdS не происходит заметной взаимодиффузии атомов. Толщина переходного слоя составляет $\sim 3-5$ Å и начиная с $d \approx 20$ Å значение I_S практически не меняется и не отличается от таковых для чистых пленок CdS. После прогрева этой системы при $T \approx 700$ К в течение 1 часа интенсивность оже-пика Ва на поверхности уменьшается приблизительно в 1.5 раза и появляется

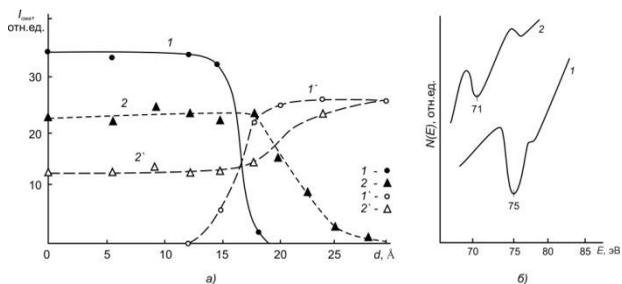


Рис. 1. а – Зависимость интенсивности оже-пика Ва (кривые 1, 2) и S (кривые 1', 2') от d для CdS с пленкой Ватолщиной $\theta = 5$ монослоев: 1.1' - до прогрева, 2.2' - после прогрева при $T=700$ К в течение 1 часа; б – оже-спектр Ва в области $E = 70 - 85$ эВ, для CdS с пленкой Ватолщиной $\theta = 5$ монослоев: 1 – до прогрева, 2 – после прогрева при $T=700$ К

интенсивный пик S. Интенсивности оже-пиков I_{Ba} и I_S практически не меняются до глубины 18–20 Å. Образование соединений между атомами Ва и S нами определены по изменению положения и формы низкоэнергетического пика бария N_5O_2V ($E_2 = 75$ эВ), связанного с переходом электронов из валентной зоны. Из вставки рис. 1 видно, что пик Ва с $E_2 = 75$ эВ после прогрева практически исчезает и появляется новый пик при $E_2 = 71$ эВ. Расчеты показали, что после прогрева концентрация Ва составляла $\sim 65 - 70$ ат.%, а S – 30 - 35 ат.%. Установили, что после прогрева образуются соединения типа Ba_2S . В интервале $d \approx 18-30$ Å I_{Ba} уменьшается до нуля (в пределах чувствительности оже-спектрометра), а I_S увеличивается до значения I_S чистой пленки CdS. Таким образом, на границе системы BaS_2/CdS формируется переходной слой толщиной $\sim 10-12$ Å. Основываясь на этих результатах, мы предполагаем, что при прогреве в основном происходит диффузия атомов S в пленку Ва. В переходном слое в интервале $d \approx 20-25$ Å, по-видимому, содержится соединение типа Ва-Cd-S, $Cd_{1-x}S_x$ ($x \leq 0.5$).

Список литературы

1. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Раббимов Э.А., Содикжанов Ж., Уроков А.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 12, 76 (2019). DOI: 10.1134/S1028096019120343
2. Эргашов Ё.С., Ташмухамедова Д.А., Раббимов Э. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон.исслед, 4, 38 (2015). <https://doi.org/10.7868/S0207352815040083>.

Г.В. ТИХОНОВСКИЙ, А.А. ПОПОВ, Е.А. ПОПОВА-КУЗНЕЦОВА,
И.Н ЗАВЕСТОВСКАЯ, А.В. КАБАШИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА САМАРИЯ 152 И ЭЛЕМЕНТНОГО ВИСМУТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БИМЕДИЦИНЕ

Разработаны методы фемтосекундной лазерной абляции в воде и органических растворителях (ацетон, этанол, изопропанол) эффективной генерации наночастиц оксида самария, обогащённого изотопом Sm 152, а также наночастиц висмута, являющихся перспективными альтернативными материалами для применений в целях ядерной и радиационной медицины. Разработана технология прецизионного контроля размерных, а также морфологических характеристик водных коллоидных растворов наночастиц оксида самария 152 посредством регулирования исходных параметров синтеза, а также при помощи использования дополнительного этапа лазерной обработки – фрагментации. Разработаны методы контроля морфологических, размерных, а также поверхностных характеристик коллоидных растворов наночастиц висмута посредством использования разных типов дисперсных сред и регулирования исходных параметров лазерного синтеза. Разработаны простые методы поверхностной функционализации наночастиц элементного висмута тремя разными типами поверхностных агентов (PluronicF68, PluronicF127). Проведена полная характеристика размерных (DLS, STEM), морфологических (SEM), структурных (EDS), оптических, поверхностных (ζ -потенциал) параметров синтезированных коллоидных растворов наночастиц.

G. V. TIKHONOWSKI, A. A. POPOV, E. A. POPOVA-KUZNETSOVA, I. N.
ZAVESTOVSKAYA, A. V. KABASHIN

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

LASER SYNTHESIS OF COLLOIDAL SOLUTIONS OF SAMARIUM OXIDE 152 AND ELEMENTAL BISMUTH NANOPARTICLES FOR NUCLEAR AND RADIATION BIOMEDICINE

We elaborated methods of femtosecond laser ablation in water and organic solvents (acetone, ethanol, isopropanol) for the efficient generation of samarium oxide nanoparticles, enriched with the Sm 152 isotope, as well as bismuth nanoparticles, which are promising alternative materials for applications in nuclear and radiation medicine. Also, we elaborated technique for precision control of dimensional and morphological characteristics of aqueous colloidal solutions of samarium oxide 152 nanoparticles by adjusting the initial parameters of synthesis, as well as using an additional step of laser processing - fragmentation. We developed methods for monitoring the morphological, dimensional, and surface characteristics of colloidal solutions of

bismuth nanoparticles by using different types of dispersed media and controlling the initial parameters of laser synthesis. Also, we found and described simple methods for the surface functionalization of elemental bismuth nanoparticles with three different types of surface agents (Pluronic F68, Pluronic F127). A complete characterization of the dimensional (DLS, STEM), morphological (SEM), structural (EDS), optical, surface (ζ -potential) parameters of the synthesized colloidal solutions of nanoparticles was carried out.

Разработаны и детально описаны повторяемые и легко воспроизводимые методы генерации коллоидных растворов наночастиц элементного висмута и оксида самария 152 методом фемтосекундной лазерной абляции и фрагментации в жидкости [1-3], обладающих контролируемым средним размером и шириной размерного и морфологического распределения, низкой полидисперсностью, абсолютно чистой поверхностью и высокой коллоидной стабильностью, проведена полная характеристика синтезированных наночастиц при помощи различных аналитических методов.

Показано, что абляция мишени Вi с помощью фс-лазера приводит к формированию сферических элементных наночастиц Вi со средним размером 20–50 нм и малой дисперсией по размерам. НЧ, приготовленные в воде, быстро превращаются в хлопьевидные нано-листы размером 400–500 нм, состоящие из субкарбонатов висмута. Стабильный водный раствор наночастиц Вi, пригодных для биомедицинских применений, может быть получен путем покрытия наночастиц Pluronic® F68, F127. В то же время мы показываем, что методы фс-лазерной абляции мишени из оксида самария, обогащенного ^{152}Sm , могут быть применены для синтеза растворов НЧ с относительно узким распределением по размерам, сферической морфологии и контролируемым средним размером от 7 до 70 нм, обладающих высокой коллоидной стабильностью.

Список литературы

1. Julia C. Bulmahn, Gleb Tikhonowski, Anton A. Popov et al // *Nanomaterials*. 2020. 10(8), 1463, doi: 10.3390/nano10081463.
2. Elena Popova-Kuznetsova 1, Gleb Tikhonowski 1, Anton A. Popov et al // *Nanomaterials* 2020, 10(1), 69; doi: 10.3390/nano10010069.
3. E. Popova-Kuznetsova, G. Tikhonowski, A. A. Popov et al // *Proceedings Volume 11269, Synthesis and Photonics of Nanoscale Materials XVII*; 1126904 (2020), doi: 10.1117/12.2551432.

А.Н. УЛУКМУРАДОВ, И.Д. ЯДГАРОВ, Д.В. АЛЯБЬЕВ
*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент,
Узбекистан*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМОВ ВОДОРОДА С ГРАНЯМИ УЕДИНЕННОГО ФУЛЛЕРЕНА

Приведены результаты модельных экспериментов рассеяния атомов водорода гранями уединенной молекулы фуллерена (пентагонами, гексагонами). Приведены сравнительные данные по энергетическим и угловым зависимостям для инкапсулированного фуллереном атома водорода.

A.N. ULUKMURADOV, I.D. YADGAROV, D.V. ALYABEV
Institute of Ion-plasma and laser technology, Tashkent, Uzbekistan

MODELING OF INTERACTION PROCESSES OF HYDROGEN ATOMS WITH THE FACES OF SINGLE FULLERENE

The results of model experiments on the scattering of hydrogen atoms on the faces of the single fullerene molecule (pentagons, hexagons) are presented. Comparative data on the energy and angular dependences for the fullerene-encapsulated hydrogen atom are presented.

Компьютерным моделированием с использованием методов молекулярной динамики в рамках потенциала Бреннера [1] определялись вероятности образования эндофуллерена $H@C_{60}$ с энергиями атомов водорода $E_k=4, 6, 8$ и 10 эВ, при нормальном падении на гексагон и пентагон фуллерена, а в случае $E_k=10$ эВ дополнительно рассмотрены углы падения $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ и 20° , отсчитываемые от нормали к гексагону или пентагону (рис. 1). Графики, показанные на рис. 1 дают представления о зависимости вероятности образования эндофуллерена $H@C_{60}$ от энергии и угла падения атомов водорода на одиночный свободный фуллерен.

Как показали модельные эксперименты, максимальная вероятность образования P_{max} эндофуллерена $H@C_{60}$, равная приблизительно 12%, при энергии атома водорода $E(P_{max})$ около 8 эВ. Следует отметить, что хоть и очень редко, но при $E_k=10$ эВ в фуллерене образуются дефекты: один из атомов углерода в фуллерене выбивается из оболочки фуллерена и образуется вакансия.

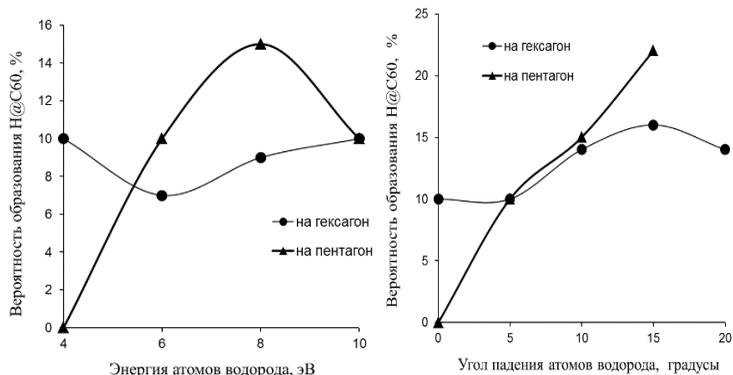


Рис. 1: слева: зависимости вероятности образования эндофуллерена $H@C_{60}$ от энергии атомов водорода при нормальном падении на гексагон или пентагон одиночного свободного фуллерена; справа: зависимости вероятности образования эндофуллерена $H@C_{60}$ от угла падения атомов водорода на гексагон или пентагон одиночного свободного фуллерена

Результаты компьютерного моделирования показали, что помимо образования эндофуллерена $H@C_{60}$ наблюдается гидрирование фуллерена. В данной ситуации гидрирование фуллерена - это часть случаев хемосорбции атомов водорода, а именно, хемосорбция на внешней стороне фуллерена. Другая же часть случаев хемосорбции, а именно хемосорбция на внутренней стороне фуллерена, соответствует образованию эндофуллерена $H@C_{60}$. Согласно результатам проведенных компьютерных расчетов, атомы водорода внутри фуллерена редко остаются химически несвязанными с атомами фуллерена при своем проникновении внутрь фуллерена.

Результаты модельных экспериментов показывают, что для атомов водорода существует некоторое значение энергии (рассеиваемых атомов водорода), при значении которой наблюдается максимальная вероятность образования эндофуллерена $H@C_{60}$, наименьшее значение энергии, необходимое для внедрения в фуллерен атома водорода принимает значение около 3 эВ.

Список литературы

1. D.W. Brenner, O.A. Shenderova, J.A. Harrison, S.J. Stuart, B. Ni, S.B. Sinnott, J. Phys: Condens. Matter. 14, 783 (2002).

Б.Е. УМИРЗАКОВ¹, А.К. ТАШАТОВ², Н.М. МУСТАФОЕВА²,

¹*Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан*

²*Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПЛЕНОК NiSi₂/Si

Методом низкоэнергетической ($E_0=1-5$ кэВ) имплантации ионов Ni в сочетании с отжигом получены однородные эпитаксиальные нанопленки NiSi₂ толщиной $\sim 3.0-6.0$ nm. Исследованы зонно-энергетические параметры, плотности электронных состояний, эмиссионные и оптические параметры системы NiSi₂/Si(111). Показано, что ширина запрещенной зоны нанопленок NiSi₂ составляет $\sim 0,5-0,6$ эВ, квантовый выход фотоэлектронов $\sim 4 \cdot 10^{-4}$, удельное сопротивление ($60-80 \mu\Omega \cdot cm$).

B.E. UMIRZAKOV¹, A.K. TASHATOV², N.M. MUSTAFOEVA²,

¹*Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan*

²*Karshi State University, Karshi, Uzbekistan*

RESEARCH OF PHYSICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF NiSi₂ / Si NANOFILMS

The method of low-energy ($E_0 = 1-5$ кэВ) implantation of Ni ions in combination with annealing was used to obtain homogeneous epitaxial NiSi₂ nanofilms with a thickness of $\sim 3.0-6.0$ nm. The energy-band parameters, the density of electronic states, and the emission and optical parameters of the NiSi₂/Si(111) system have been investigated. It is shown that the band gap of NiSi₂ nanofilms is $\sim 0.5-0.6$ эВ, the quantum yield of photoelectrons is $\sim 4 \cdot 10^{-4}$, and the resistivity.

Пленки CoSi₂ и NiSi₂, полученные методами молекулярно-лучевой и твердофазной эпитаксии, широко используются в создании МДП- и ПДП-структур, транзисторов с проникаемой и металлической базами, барьерных слоев и омических контактов. Поэтому получению и изучению состава, структуры и свойств тонких пленок силицидов, особенно CoSi₂, посвящено большое число работ [1-2]. В этих системах толщина пленки силицидов составляет больше, чем 30-50 nm. Уменьшение толщины этих пленок способствует созданию сверхвысокочастотных транзисторов и интегральных схем, работающих с предельной частотой >100 GHz. Одним из перспективных методов получения нанокристаллов и нанопленок с толщиной $d < 5-10$ nm на поверхности полупроводников является низкоэнергетическая ионная имплантация [2].

В настоящей работе впервые исследованы основные физические свойства наноразмерных структур NiSi_2 , созданных на поверхности Si методом низкоэнергетической ионной имплантации.

Исследования проводились и для пленок NiSi_2/Si , полученных имплантацией ионов Ni с $E_0=3$ и 5 кэВ. При этом после прогрева формировались пленки NiSi_2 с толщиной 4.5-5.0 и 6.0-6.5 nm соответственно. В таблице приведены некоторые физические параметры Si и пленки NiSi_2/Si с толщиной $d = 3.0$ и 6.0 nm, где φ и Φ - термо и фотоэлектронная работу выхода, E_g - ширина запрещенной зоны, χ -средство к электрону, σ_m -максимальное значение коэффициента ВЭЭ, Y -квантовый выход фотоэлектронов, ρ - удельное сопротивление. Для сравнения там же приведены параметры для толстой пленки NiSi_2 с толщиной 50.0 nm, полученной методом твердофазной эпитаксии.

Зонно-энергетические, эмиссионные и оптические параметры Si(111) и пленок $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$

Образец	d,nm	φ , эВ	Φ ,эВ	E_g ,эВ	χ ,эВ	σ_m	Y	ρ , $\mu\Omega \cdot \text{cm}$
Si(111)	0	4.7	5.1	1.1	4	1.1	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^6$
$\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$	3.0	4.3	4	0.6	3.4	1.5	$4 \cdot 10^{-4}$	80
	6.0	-	4	0.5	3.5	1.6	$4 \cdot 10^{-4}$	60
	50.0	4.2	4	0.5	3.5	1.6	-	55

Из таблицы видно, что ширина запрещенной зоны NiSi_2 с $d = 3.0$ nm составляет 0.6 эВ и обладает свойствами, близкими к металлам ($\rho = 80 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). При этом значение σ_m иувеличивается до 1.5 и 2 раза. По-видимому, эмиссионная эффективность слоев NiSi_2 немного больше, чем эффективность слоев Si, что может быть связано с заметным отличием атомной плотности NiSi_2 ($\sim 4.5 \text{g}/\text{cm}^3$) от плотности Si ($2.42 \text{g}/\text{cm}^3$). Электронные и оптические свойства пленок NiSi_2 с $d = 6.0$ nm существенно не отличались от таковых для толстой пленки.

Список литературы

1. Алексеев А.А., Олянич Д.А., Утас Т.В., Котляр В.Г., Зотов А.В., Саранин А.А. //ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 94-100.
2. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Muradkabilov D.M., Boltazb X.X. // Technical Physics, 2013, Vol. 58, N 6, p. 841-844

Б.Е. УМИРЗАКОВ, С.Ж. НИМАТОВ, Ф.Я. ХУДАЙКУЛОВ
Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ SI(111) ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Методом дифракции электронов низкой энергии (ДЭНЭ) при контроле изменения работы выхода поверхности $\Delta\phi$ изучено кинетика формирования на поверхности Si(111) мономолекулярного слоя пленки NaCl при низкоэнергетической ионной бомбардировке.

B.Y. UMIRZAKOV, S.J. NIMATOV, F.Y. KHUDAYQULOV
Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

FEATURES OF THE FORMATION OF STRUCTURES OF THE SI(111) SURFACE DURING ION IMPLANTATION

The kinetics of the formation of a monomolecular layer of a NaCl film on the Si (111) surface during low-energy ion bombardment has been studied by the low-energy electron diffraction (LEED) method with monitoring the change in the surface work function $\Delta\phi$.

Создание на поверхности твердых тел сверхтонких пленок сложного состава низкоэнергетической ($E_n \leq 1000$ эВ) ионной имплантацией является актуальным и перспективным направлением современной наноэлектроники. В работе, методами визуальной и динамической дифракции электронов низкой энергии (ДЭНЭ, ДЭНЭ рефлекс /фон) при контроле изменения работы выхода поверхности $\Delta\phi$ изучена кинетика формирования на Si(111) тонкого слоя пленки NaCl. Пленки получали поочередно из низкоэнергетических пучков Cl^- , Na^+ поставляемых специальным ионным источником с переполюсовкой, [1] и из молекулярного потока, при испарении химически чистой соли NaCl из кварцевого тигля. В случае низкоэнергетической ионной имплантации обнаружена плавная кинетика изменения дифракционной интенсивности при переходах Si (111)-(1×1) → Si (111) - (5×5)Cl → Si(111) - (1×1)NaCl – R30°, отражающих синтез двумерной эпитаксиальной пленки NaCl из ионных пучков. Параллельно ДЭНЭ, за ростом покрытия следили по изменению работы выхода поверхности $\Delta\phi$, контролируемой по методу Андерсена. Структурное совершенство полученных эпитаксиальных слоев оценивали методом контроля отношения дифракционной и фоновой интенсивностей картин ДЭНЭ (ДЭНЭ «рефлекс/фон»). Это позволило в итоге оптимизировать параметры ионного синтеза: энергию и дозу ионных пучков, температуру подложки при облучении

и отжиге покрытия. Все эксперименты выполнены в сверхвысоком вакууме $P_{\text{ост.}} < 5 \cdot 10^{-8}$ Па на базе установки УСУ-4 и низковольтного электронографа оригинальной конструкции [1].

При плотности тока ионов натрия $\sim 10^{-5}$ А·см⁻² максимум дифракционной интенсивности достигался за несколько секунд, а при $\sim 10^{-7}$ А·см⁻² - в течении 2-3 минут. Это подтверждает, что для образования новой структуры необходимо накопление натрия на поверхности до концентрации, соответствующей стехиометрическому соотношению.

Характер изменения дифракционной картины свидетельствует об островковой двумерной росте пленки NaCl с сохранением в процессе бомбардировки дальнего порядка структуры $(5 \times 5)Cl$. Продолжение бомбардировки после достижения максимума интенсивности новой структуры приводит к быстрой деградации дифракционной картины, связанной с накоплением избыточного натрия.

Экспериментально установлено, что в процессе образования островков работа выхода поверхности меняется немонотонно. Максимальное значение ϕ достигается при полной коалесценции островков в сплошную пленку NaCl и обусловлено, очевидно, как увеличением плотности атомов в верхнем слое, так и усилением латерального взаимодействия. При дальнейшем увеличении дозы бомбардировки ионами Na⁺ работа выхода уменьшается до значения, близкого для компактного натрия, а поверхность при этом аморфизуется. Необходимо отметить, что при конденсации из атомарного потока наблюдался аморфный осадок, и лишь осаждение из ионного пучка вызывало появление новой структуры.

Список литературы

1. Б.Е. Умирзаков, С.Ж. Ниматов, Д.С. Руми. Структура и свойства многослойных нанопленочных систем созданных на основе кремния // Ташкент. Издательство "InfinityGroup", 2013, 160 с.

А.В. ФРОЛОВ¹, А.П. ОРЛОВ^{1,2}, А.Г. ТЕМИРЯЗЕВ³

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

²*Институт нанотехнологий и микроэлектроники РАН, Москва, Россия*

³*Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН Фрязинский филиал, Фрязино, Россия*

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСЛОЙНОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ И СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ АТОМНО ТОНКИХ ПЛЁНОК Bi_2Se_3

Установлена точная зависимость прозрачности монокристаллических плёнок топологического изолятора Bi_2Se_3 от их толщины в диапазоне толщин от 1 до 20 пятислойников Se-Bi-Se-Bi-Se. Метод оптического контроля, используемый в работе, позволяет послойно определять толщину плёнки, а также степень окисления её поверхности – параметры, определяющие транспорт в плёнках трёхмерных топологических изоляторов.

A.V. FROLOV¹, A.P. ORLOV^{1,2}, A.G. TEMIRYAZEVA³

¹*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia*

²*Institute of Nanotechnology and Microelectronics, RAS, Moscow, Russia*

³*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS Fryazino branch, Fryazino, Russia*

OPTICAL METHOD OF LAYER-BY-LAYER CONTROL OF THE THICKNESS AND DEGREE OF DEGRADATION OF THE SURFACE OF ATOMICALLY THIN Bi_2Se_3 FILMS

The exact dependence of the transparency of single-crystal films of the topological insulator Bi_2Se_3 on their thickness in the range of thicknesses from 1 to 20 five-layer Se-Bi-Se-Bi-Se has been established. The optical control method used in this work allows determining the thickness of the film layer by layer, as well as evaluating the degree of oxidation of its surface, which is extremely important for three-dimensional topological insulator films.

При изучении транспортных свойств атомно тонких проводящих плёнок крайне важно точно определять их толщину, так как присутствие на поверхности даже одного дополнительного слоя кристаллической решётки или оксидного слоя может значительно влиять на концентрацию и спектр носителей заряда и, соответственно, на оптические, транспортные, и другие свойства плёнки. Особенно это актуально для таких материалов, как трёхмерные топологические изоляторы, в которых при низких температурах свойства поверхности являются определяющими в транспорте [1].

В работе исследовалась прозрачность монокристаллических плёнок топологического изолятора Bi_2Se_3 , полученных микромеханическим расщеплением на прозрачной подложке, в диапазоне видимого света [2]. Была определена прозрачность порядка 200 плёнок, на основе чего было получено, что для плёнок, состоящих из менее чем 20 пятислойников (1 пятислойник ≈ 1 нм), можно получить точное соответствие прозрачности и толщины. Зависимость коэффициента пропускания плёнки T от числа слоёв N хорошо интерполируется формулой $T = 100\% \cdot (1 + aN)^{-2}$, где a – параметр, определяющий отражение от одного квинтипла Bi_2Se_3 , для плёнок, исследуемых в данной работе, $a = 0.131$.

Также в работе исследовалось, как изменяется прозрачность плёнок со временем. Известно, что поверхностный слой Bi_2Se_3 со временем окисляется в комнатных условиях из-за взаимодействия с парами воды и кислородом. Было получено, что прозрачность плёнок Bi_2Se_3 медленно возрастает. Возрастание наблюдается для всех исследуемых плёнок и имеет асимптотический вид, причём скорость, с которой деградирует поверхность плёнок, близка для плёнок разной толщины. Время окисления одного атомного слоя Bi_2Se_3 составляет ~ 13 дней. Полученные результаты для плёнок Bi_2Se_3 находятся в согласии с другими работами, в которых процесс окисления поверхности исследовался альтернативными методами.

Таким образом, опробованная в работе методика определения толщины атомно тонких проводящих плёнок по их прозрачности показала себя крайне эффективной для монокристаллических плёнок Bi_2Se_3 , для оценки как их толщины, так и степени окисления поверхностного слоя.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ, проект № СП-3332.2019.2.

Список литературы

1. Hasan M. Z., Kane C. L. Colloquium: topological insulators //Reviews of modern physics. – 2010. – Т. 82. – №. 4. – С. 3045.
2. Frolov A. V. et al. //JETP Letters. – 2018. – Vol. 107. – №. 8. – P. 488-492.

Н.П. ЧЕРЕЗОВ, Е.В. ПЕТРОВ, В.К. ПРОКУДИНА

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им.
А.Г.Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия*

ПОЛУЧЕНИЕ ТИТАНОВОГО ПОРОШКА МЕТОДОМ СВС-ГИДРИРОВАНИЯ И ДЕГИДРИРОВАНИЯ В ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ

В работе рассматривается получение порошка титана заданного фракционного состава методом СВС-гидрирования и дегидрирования термическим нагревом в вакуумной электропечи. Изучены особенности процесса и схема получения порошка титана данным методом.

N.P. CHEREZOV, E.V. PETROV, V.K. PROKUDINA

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of
Sciences, Chernogolovka, Russia*

PRODUCTION OF TITANIUM POWDER BY THE METHOD OF SHS-HYDROGENATION AND DEHYDROGENATION IN A VACUUM FURNACE

The paper considers the production of titanium powder of predetermined fractional composition by SHS hydrogenation and dehydrogenation by thermal heating in a vacuum electric furnace. The features of the process and the scheme of obtaining titanium powder by this method are studied.

Титан обладает уникальными химико-металлургическими свойствами, благодаря этому занимает среди технически важных металлов четвертое место после алюминия, железа и магния. Основным сырьем для изготовления порошка титана является титановая губка. Размалывание титановой губки на порошки мелкой фракции является трудной задачей, поскольку чистый титан обладает высокими пластическими свойствами.

Получение порошка титана заданного фракционного состава возможно в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), сочетающего процессы горения исходных компонентов в режиме СВС и насыщение порошка титана водородом, и дегидрированием в вакуумной электропечи. Основными критериями данного процесса являются: короткое время синтеза, высокие температуры горения, большие скорости нагрева и кратковременность процесса формирования структуры. Суть метода заключается во взаимодействии титана с водородом в режиме горения, с последующим прохождением СВС [1]. Титан, насыщаясь водородом, становится

хрупким и легко измельчается, далее следует этап дегидрирования в вакуумной печи для удаления избыточного водорода из гидрированного порошка (рис. 1).

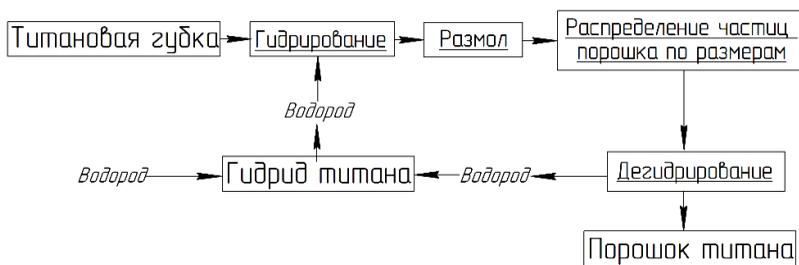


Рис. 1. Схема процесса СВС-гидрирования и дегидрирования порошка титана в замкнутом цикле по водороду

В отличие от традиционного метода для поддержания требуемой температуры материала используется тепло собственной экзотермической реакции соединения металла с водородом, что делает метод СВС-гидрирования и дегидрирования более экономичным и технологичным. Процесс сохраняет в титане на низком уровне содержание примесей, прежде всего, кислорода и углерода. Это важно, поскольку примеси существенно влияют на скорость диффузионных процессов в металлах. Кроме того, использование водорода в замкнутом цикле позволяет значительно оптимизировать процесс получения порошка. В то же время, распределение водорода в титане при СВС-гидрировании, в большинстве случаев, неоднородно. Особенность процессов СВС такова, что взаимодействие титана с водородом происходит в узкой зоне волны (фронта) горения, которая достаточно быстро перемещается по титану до тех пор, пока достаточно водорода для поддержания реакции [2,3].

Проблемной особенностью СВС-гидрирования порошка титана является риск недостаточного развития диффузии водорода вглубь частиц исходной губки вследствие быстротечности процесса СВС. Несмотря на это рассматриваемый метод является энергоэффективным и менее энергозатратным при синтезе материалов, поскольку нет длительных нагревов характерных для печной металлургии.

Список литературы

1. Боровицкая И.П., Мержанов А.Г., Ратников В.И. Патент РФ № 2208573, от 13.01.2002
2. Дехтяр А.И., Ивасишин О.М., Ковалёв Д.И. и другие// Металлофизика и новейшие технологии.2014. Том 36, № 9, с. 1153-1169.
3. Prokudina V.K., Kovalev D.Yu., Ratnikov V.I. and others// Russ. J. of Non-Ferrous Metals. 2015. Vol. 56, № 1, P. 86–91.

Г.Ш. ШАПИЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Д.К. ПАЛЧАЕВ, М.Х.
РАБАДАНОВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, П.М. САЙПУЛАЕВ

Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

МОРФОЛОГИЯ НАНОПОРОШКОВ $Y(Be_{1-x}Ba_x)_2Cu_3O_{7-d}$

Представлены результаты исследования морфологии порошков состава $Y(Be_{0.5}Ba_{0.5})_2Cu_3O_{7-d}$ с технологическим замещением Be на Ba, синтезированных золь-гель методом и термообработанных при температурах 600°C, 700°C, 800°C и 900°C. Установлено, что все образцы содержат большое количество адсорбированного кислорода, в среднем, от ~ 55% до ~ 60%.

G.SH. SHAPIEV, S.KH. GADZHIMAGOMEDOV, D.K. PALCHAEV,
M.KH. RABADANOV, ZH.KH. MURLIEVA,
P.M. SAYPULAEV

Dagestan State University, Makhachkala, Russia

MORPHOLOGY OF $Y(Be_{1-x}Ba_x)_2Cu_3O_{7-d}$ NANOPOWDERS

The paper presents the results of studying the morphology of powders of the composition $Y(Be_{0.5}Ba_{0.5})_2Cu_3O_{7-d}$ with technological substitution of Be for Ba, synthesized by the sol-gel method and heat treated at temperatures of 600°C, 700°C, 800°C and 900°C. It was found that all samples contain a large amount of adsorbed oxygen, on average, from ~ 55% to ~ 60%.

Нанопорошки состава $Y(Be_{0.5}Ba_{0.5})_2Cu_3O_{7-d}$, с технологическим замещением Be на Ba, были синтезированы золь – гель методом [1]. В водный раствор из нитратов Y, Be, Ba и Cu добавлялся глицин. Процесс выпаривания при непрерывном помешивании, используя магнитную мешалку, осуществлялся в несколько этапов (оптимально – до трех) с дополнительным добавлением воды по мере необходимости. В конце этого процесса реакция горения протекает мгновенно со вспышкой осадка, образуя мелкодисперсный агломерированный нанопорошок с насыпной плотностью не более ~ 0.1 г/см³. Для формирования заданной структуры порошки термообрабатывались при температурах 600°C, 700°C, 800°C и 900°C.

В результате такой термообработки были получены образцы нанопорошков, представляющие с собой механические смеси различных соединений. На рисунке 1 приведены морфологии этих порошков после термообработки 600°C, 700°C, 800°C и 900°C. Исследования проводились на СЭМ ASPEX Express с EDX-анализатором. Согласно элементному анализу, образцы содержали большое количество адсорбированного кислорода, в среднем, от ~ 55% до ~ 60%, в связи, с чем можно предположить, что элементы Y, Ba и Cu присутствуют в соединении в виде оксидов. При этом в образце после обработки при 600°C обнаружено

наименьшее количество Ва (до ~ 5%). Это подтверждается и исследованиями структуры для исходного порошка, согласно которым в нем присутствуют, в основном, фазы оксидов меди: CuO (до ~94%) и Cu_2O (до ~4%). Однако, с повышением температуры обработки на 100°C количество Ва увеличивается примерно в 3 раза, а при дальнейшем ее росте (до 900°C) это значение существенно не изменяется.

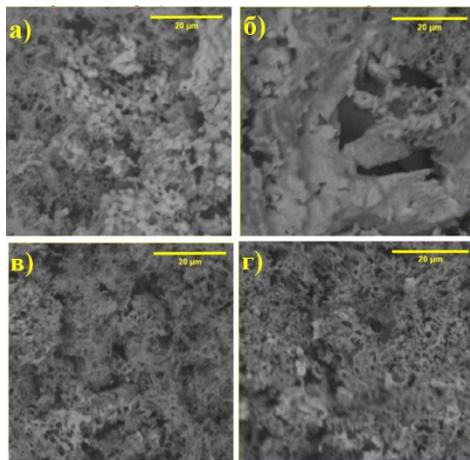


Рис. 1. Морфология порошков после термообработки при температурах: 600°C – а), 700°C – б), 800°C – в) и 900°C – г).

Эти нанопорошки, представляющие собой механические смеси различных соединений оксидов, были использованы для изготовления терморезистивных керамик, содержащих сверхпроводящие включения в высокоомной матрице.

Работа была поддержана грантом «УМНИК» №14045ГУ/2019, а также частично грантом РФФИ № 18-08-00092а и Гос. заданием FZNZ-2020-0002.

Список литературы

1. Рабаданов М.Х. и др. // Патент №2486161 от 27.06.2013.

П.В. ШАХОВ¹, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС¹, Э.Р. ТОЛОРДАВА²,
И.Н. САРАЕВА¹, А.А. РУДЕНКО¹, Р.А. ХМЕЛЬНИЦКИЙ¹,
С.И. КУДРЯШОВ¹, А.А. ИОНИН¹

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук ФИАН, Москва,
Россия

²Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени
Н.Ф.Гамалеи, Москва, Россия

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ NiO_x МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ И ПРОВЕРКА ИХ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ

Рассмотрен процесс абляции и дальнейшего получения коллоидного раствора наночастиц NiO_x в деионизованной воде и их характеристика методами рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсного рентгеновского излучения, комбинационного рассеяния, ИК-Фурье спектроскопии, динамического рассеяния света, измерен зета-потенциал. Исследованы антибактериальные свойства полученных частиц комплексными микробиологическими тестами.

P.V. SHAKHOV¹, A.A. NASTULYAVICHUS¹,
E.R. TOLORDAVA², I.N. SARAEVA¹, A.A. RUDENKO¹,
R.A. KHMELNITSKIY¹, S.I. KUDRYASHOV¹, A.A. IONIN¹

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

²N.F. Gamaleya Federal Research Centre of Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia

SYNTHESIS OF NiO_x NANOPARTICLES BY LASER ABLATION IN LIQUID AND VERIFICATION OF THEIR ANTIBACTERIAL PROPERTIES

The process of ablation and further preparation of a colloidal solution of NiO_x nanoparticles in deionized water and their characterization by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray, Raman, FT-IR spectroscopy, dynamic light scattering are considered, the zeta potential is measured. The antibacterial properties of the obtained particles were investigated by complex microbiological tests.

Пищевые патогенные бактерии являются нежелательным, но неизбежным элементом среды обитания человека. Для поддержания высокого уровня безопасности продуктов пищевой промышленности и при этом сохраняя их невысокую стоимость для потребителя лаборатории по всему миру занимаются исследованиями, направленными на борьбу с патогенными бактериями [1].

Металлические наночастицы, которые обычно присутствуют в частично окисленной форме могут выступать в роли инструмента для поражения

патогенных организмов, используя в качестве ключевого фактора воздействия один из вышеперечисленных методов или их комбинацию [2].

Целью исследования является создание коллоидных цитотоксических нано- и микрочастиц на основе никеля в деионизованной воде в целях предотвращения формирования и устранения биопленок патогенных микроорганизмов. На рис.1 представлена визуализация СЭМ наночастиц коллоидного раствора никеля, которые в дальнейшем будут использованы для проверки антибактериальных свойств.

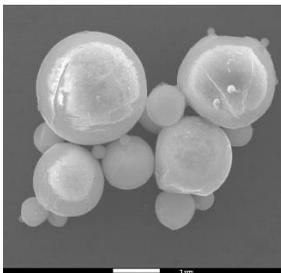


Рис 1. СЭМ визуализация наночастиц никеля, осажденных на поверхности кремния из коллоидного раствора

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

Список литературы

1. A. Nastulyavichus et al., *Nanomaterials*, 2020, 10(11), 2259
2. A. Rahdar et al., *Journal of nanostructures*. 2015, 5 (2), 145-151

Р.М. ЭМИРОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ

Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОПОРОШКА МАГНЕТИТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ МЫШЬЯКА

Одноэтапным трехэлектродным методом был получен нанопорошок магнетита Fe_3O_4 . Исследованы фазовый состав, текстурные характеристики полученного порошка, эффективность очистки водных растворов от ионов мышьяка As^{3+} .

R.M. EMIROV, M.KH. RABADANOV,

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV

Dagestan State University, Makhachkala, Russia

USE OF MAGNETITE NANOPOWDER FOR PURIFICATION OF WATER SOLUTIONS FROM ARSENIC

Magnetite nanopowder Fe_3O_4 was obtained by a one-stage three-electrode method. The phase composition, textural characteristics of the obtained powder, and the efficiency of purification of aqueous solutions from arsenic ions As^{3+} were investigated.

Эффективная очистка промышленных стоков и природных вод от ионов тяжелых металлов является острой экологической и промышленной проблемой [1]. В связи с чем, актуальна задача получения новых высокосорбционных материалов. Перспективным сорбентом для решения данной задачи, является нанопорошок магнетита, который был получен нами в трёхэлектродной ячейке в один этап.

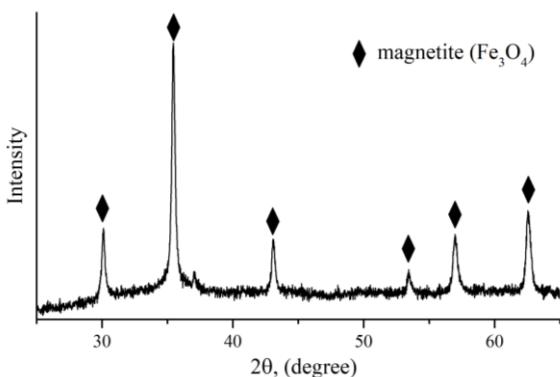


Рис.1.
Дифрактограмма
нанопорошка,
полученного

Из рисунка 1 видно, что все пики соответствуют кубической фазе магнетита. Средний размер кристаллитов, вычисленный по формуле Шеррера, равен ~ 25 нм.

В таблице 1 представлены текстурные характеристики полученного магнетита. В таблицах 2 и 3 представлены результаты очистки водных растворов от мышьяка в зависимости от массы сорбента и времени обработки, соответственно.

Таблица 1. Текстурные характеристики магнетита.

Текстурные характеристики	Значение
Величина удельной поверхности, м ² /г	19.5
Удельный объем монослоя, НТД/г	4.48
Константа БЭТ	37
Удельная поверхность мезопор м ² /г	36.0

Таблица 2. Зависимость степени извлечения мышьяка (h) от массы сорбента (m) (V= 100 мл; t= 2 ч; C_{As}=0,1 мг/л)

m, гр.	0.1	0.2	0.5	0.7	1.0
h, %	24.6	40.2	57.0	63.5	82.1

Таблица 3. Зависимость остаточной концентрации мышьяка от времени обработки растворов магнетитом (V=100 мл; m=0,2 г; C_{As}=0,1 мг/л)

t ⁰ , час	0	0,5	1	3	24
C _{As} , мг/л	0,100	0,085	0,065	0,055	0,005

Из таблицы 1 видим, что удельная поверхность равна 19.5 м²/г, что во много раз больше (1.78 м²/г) природного магнетита [2]. Высокое значение удельной поверхности увеличили сорбционные свойства магнетита, что показано в таблицах 2 и 3.

Работа поддержана грантом Главы Республики Дагестан, а также частично ГЗ №FZNZ-2020-0002.

Список литературы

1. Зайнуллин Р.Р., Галяутдинов А.А. // Инновационная наука. 2016. №6-2.
2. Salazar-Camacho, C., Villalobos, M., de la Alatorre, J., Alcaez-Cienfuegos, J., Gutierrez-Ruiz, M.E. // Gem. Geol., 2013, vol. 347, p. 233.

М.О. ЭТРЕКОВА^{1,2}, А.В. ЛИТВИНОВ¹, А.А. МИХАЙЛОВ²

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

² *ООО «Научно-производственная фирма «ИНКРАМ», г. Москва, Россия*

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНЫХ МДП-СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ, ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИМЕТИЛДИСУЛЬФИДА

Разработан способ измерения массовой концентрации диметилдисульфида (ДМДС, CAS 624-92-0) $(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$ в воздухе с помощью МДП-сенсоров со структурой типа Pd-SiO₂-Si. Проведены исследования и подбор оптимальной рабочей температуры сенсоров для измерения концентрации ДМДС в диапазоне от 0 до 10 мг/м³ (от 0 до 6,7 ПДК рабочей зоны).

М.О. ETRKOVA^{1,2}, А. V. LITVINOV¹, А. А. MIKHAILOV²

¹ *National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation*

² *Scientific production company "INKRAM", Moscow, Russian Federation*

APPLICATION OF THE GAS SENSORS BASED ON CAPACITIVE MIS-STRUCTURES OBTAINED BY USING PLD- METHOD FOR $(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$ CONCENTRATION CONTROL

A method for measuring the mass concentration of dimethyl disulfide (DMDS, CAS 624-92-0) $(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$ in air using MIS sensors with a Pd-SiO₂-Si structure has been developed. Research and selection of the sensor's optimal operating temperature for measuring the DMDS concentration in the range from 0 to 10 mg/m³ (from 0 to 6,7 MPC of the working zone) have been carried out.

С использованием технологии импульсного лазерного напыления изготовлены газочувствительные МДП-структуры типа Pd-SiO₂-Si с управляющим металлическим электродом площадью 7 мм² из пористого палладия. Принцип газовой чувствительности таких структур заключается в обратимой адсорбции молекул газа на границе раздела тонких пленок металла и диэлектрика, которая приводит к изменению электрической емкости структуры на величину, соответствующую значению концентрации газа [1].

На основе структур изготовлены газовые сенсоры, чувствительные к концентрации диметилдисульфида, часто применяемого для борьбы с коррозией технологического оборудования в нефтехимии и металлургии. ДМДС является токсичным веществом и, согласно санитарным правилам и нормам, требует контроля концентрации в воздухе [2].

Исследования по измерению концентрации $(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$ в воздухе с помощью МДП-сенсоров проводились на экспериментальной установке, состоящей из герметичной стеклянной емкости объемом 200 л с двумя патрубками «вход», «выход» и побудителя потока. Парогазовые смеси создавались статическим методом (с помощью микрошприца АГАТ МШ-5, $5 \pm 0,25$ мкл и химического реактива ДМДС по СТП ТУ КОМП 2-473-11) и отбирались побудителем потока на сенсорный элемент.

Результаты отклика МДП-сенсора с разными рабочими температурами за 5 минут подачи ДМДС с расчетными концентрациями 5 мг/м^3 (дозирован 1 мкл реактива) и 10 мг/м^3 (2 мкл) представлены на рис. 1.

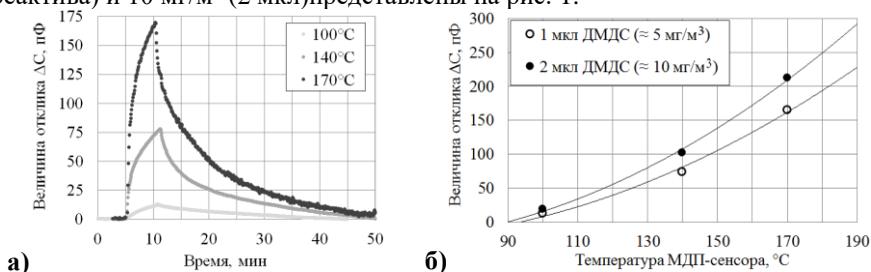


Рис.1. а) Отклик МДП-сенсора в зависимости от рабочей температуры при подаче $\approx 5 \text{ мг/м}^3$ ДМДС (1 мкл). б) Зависимость величины отклика МДП-сенсора от рабочей температуры и концентрации ДМДС.

Показано, что по мере увеличения рабочей температуры значение отклика МДП-сенсора на фиксированную концентрацию ДМДС значительно возрастает, что, вероятно, связано с повышением эффективности термического разложения молекул ДМДС с образованием тиолов и/или сероводорода на поверхности каталитически активного Pd-электрода [3].

Работа поддержана РНФ (Соглашение 18-79-10230 от 08.08.2018).

Список литературы

1. Litvinov A.V., Samotaev N.N., Etrekova M.O., Klishin Yu.A., Korolev N.A. Cluster Model of the Mechanism of Sensitivity of Gas Sensors Based on MIS Structures // *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, Vol. 82, No. 11, pp. 1499-1502.
2. Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
3. Mashkina A.V., Yakovleva V. N., Sakhaltueva L. G. Catalytic decomposition of dimethyl disulfide // *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 1994, 53(2): pp. 363-368.

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

М. Г. УРИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ПАМЯТИ А. Б. МИГДАЛА

В марте этого года исполняется 110 лет со дня рождения академика Аркадия Бенедиктовича Мигдала. В течение нескольких десятков лет А. Б. Мигдал работал в Институте им. И. В. Курчатова и по совместительству – профессором кафедры Теоретической Ядерной Физики МИФИ. В сообщении автор предполагает поделиться воспоминаниями о незаурядной Личности, выдающемся Ученом и незабываемом Учителе.

M. H. URIN

National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

MEMORY OF A. B. MIGDAL

This March marks the 110th anniversary of the birth of academician Arkady Benediktovich Migdal. For several decades, A. B. Migdal worked at the Institute named after I.V. Kurchatov and concurrently as a professor at the Department of Theoretical Nuclear Physics of MEPhI. In the report, the author proposes to share memories of an outstanding Personality, an outstanding Scientist and an unforgettable Teacher.

Н.Н. АРСЕНЬЕВ

Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, Дубна, Россия

МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГИГАНТСКОГО МОНОПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА В $^{118-132}\text{Sn}$

В приближении случайных фаз с взаимодействием Скирма SLy4 изучается влияние связи между одно- и двух-фононными компонентами волновых функций на спектр монопольных возбуждений в нейтронно-избыточных изотопах олова. Показано, что взаимодействие со сложными конфигурациями приводят к перераспределению силы монопольных возбуждений в область низких и высоких энергий возбуждения и улучшает описание экспериментальных данных в $^{118,120,122,124}\text{Sn}$. Проанализированы свойства низкоэнергетических двух-фононных монопольных возбуждений в ^{132}Sn . Мы предсказываем нижайшее двух-фононное 0^+ состояние при энергии возбуждения 8.7 МэВ, в то время как в рамках приближения случайных фаз первое 0^+ возбуждение имеет энергию 11.5 МэВ.

N.N. ARSENYEV

Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics JINR, Dubna, Russia

MICROSCOPIC DESCRIPTION OF ISOSCALAR GIANT MONOPOLE RESONANCE IN $^{118-132}\text{Sn}$

Starting from the quasiparticle random phase approximation based on the Skyrme interaction SLy4, we study the effects of phonon-phonon coupling on the monopole strength distributions of neutron-rich tin isotopes. Using the same set of parameters, we describe available experimental data for $^{118,120,122,124}\text{Sn}$ and give prediction for ^{132}Sn . 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 of ^{132}Sn . We give prediction for the excitation energy of the lowest two-phonon state $E_x = 8.7$ MeV in comparison to 11.5 MeV in the case of the lowest 0^+ state within the random phase approximation.

Изучение гигантских резонансов давно является предметом всесторонних теоретических и экспериментальных исследований. В частности, изучение изоскалярного гигантского монопольного резонанса (ГМР) в нейтронно-избыточных ядрах в настоящее время является важной задачей не только с точки зрения структуры ядра [1,2], но и из-за особой роли, которую он играет при описании многих астрофизических процессов, таких как взрыв сверхновых [3] или эволюция нейтронных звезд [4]. Одним из популярных подходов описания ГМР является квазичастичное приближение случайных фаз, с самосогласованным средним полем, полученным с эффективными силами

Скирма [2,5]. Изучение распределения монопольной ($E0$) силы в области гигантского резонанса, предполагает учета связи простых частично-дырочных конфигураций с более сложными (двух-фононными) конфигурациями [6]. Это делает необходимым расчет в большом конфигурационном пространстве. Сепарабельзация остаточного взаимодействия Скирма позволяет обойти эту трудность и проводить вычисления независимо от конфигурационного пространства [7,8]. Такие расчеты не требуют введения новых параметров.

В данном докладе мы анализируем влияние связи между одно- и двух-фононными компонентами волновых функций на распределение силы $E0$ -переходов в нейтронно-избыточных изотопах Sn. Используя один набор параметров сил Скирма, мы описываем имеющиеся экспериментальные данные в $^{118,120,122,124}\text{Sn}$ [9] и делаем предсказание свойств ГМР в $^{130,132}\text{Sn}$ [10]. Учет двух-фононных конфигураций приводят к перераспределению основной силы $E0$ -переходов как в область низких, так и область высоких энергий возбуждения.

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. Bethe H.A. // Rev. Mod. Phys. 1990. Vol. 62. P. 801–866.
4. Glendenning N.K. // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 57. P. 1120–1123.
5. Paar N., Vretenar D., Khan E., Colò G. // Rep. Prog. Phys. 2007. Vol. 70. P. 691–793.
6. Soloviev V.G. Theory of Atomic Nuclei: Quasiparticles and Phonons. 1992. Bristol/Philadelphia.
7. Giai N.V., Stoyanov Ch., Voronov V.V. // Phys. Rev. C. 1998. Vol. 57. P. 1204–1209.
8. Severyukhin A.P., Voronov V.V., Giai N.V. // Phys. Rev. C. 2008. Vol. 77. P. 024322.
9. Li T., Garg U., Liu Y., Marks R., Nayak B.K., Madhusudhana Rao P.V., Fujiwara M., Hashimoto H., Nakanishi K., Okumura S., Yosoi M., Ichikawa M., Itoh M., Matsuo R., Terazono T. M. Uchida M., Iwao Y., Kawabata T., Murakami T., Sakaguchi H., Terashima S., Yasuda Y., Zenihiro J., Akimune H., Kawase K., Harakeh M.N. // Phys. Rev. C. 2010. Vol. 81. P. 034309.
10. Arsenyev N.N., Severyukhin A.P. // in preparation.

В.И. БОНДАРЕНКО¹⁾, С.Ю. ИГАШОВ²⁾, М.Г. УРИН³⁾

¹*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия;*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия;*

³*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия;*

О ВКЛАДЕ ТЕНЗОРНЫХ СИЛ В ФОРМИРОВАНИЕ ГАМОВ-ТЕЛЛЕРОВСКОГО РЕЗОНАНСА И ЕГО ОБЕРТОНА В СРЕДНЕ-ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ С ЗАПОЛНЕННЫМИ ОБОЛОЧКАМИ

Силловые функции Гамов-Теллеровского резонанса и его обертона (зарядово-обменного гигантского спин-монополярного резонанса в $\beta^{(-)}$ -канале) оценены в рамках основанного на континуумной версии приближения случайной фазы подхода, в котором наряду со спин-изоспиновой частью сил Ландау-Мигдала (с интенсивностью g') учтены также соответствующие тензорные силы (с интенсивностью g''). Эти интенсивности найдены из условия описания в рамках подхода наблюдаемых энергий максимумов силовых функций указанных резонансов.

V.I. BONDARENKO¹⁾, S.YU. IGASHOV²⁾, M.H.URIN³⁾

¹*Shubnikov Institute of Crystallography, Federal Research Center “Crystallography and Photonics,” Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

²*All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia;*

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

ON CONTRIBUTION OF TENSOR FORCES IN FORMATION OF GAMOV-TELLER RESONANCE AND ITS OVERTONE IN MEDIUM-HEAVY CLOSED-SHELL NUCLEI.

The strength functions of Gamov-Teller resonance and its overtone (charge-exchange giant spin-monopole resonance in the $\beta^{(-)}$ -channel) are evaluated within a continuum-RPA-based approach, in which along with the spin-isospin part of Landau-Migdal forces (with the strength g') respective tensor forces (with the strength g'') are taken into account. These strengths are estimated from a description within the approach of the energy maximum of the mentioned giant resonance strength functions.

В описании произвольного гигантского резонанса в ядрах с заполненными оболочками среднее поле ядра и взаимодействие в канале частица-дырка являются исходными данными для любой модели, основанной на приближении случайной фазы (ПСФ). В недавней работе [1] предложено описание свойств Гамов-Теллеровского резонанса (ГТР) и его обертона (зарядово-обменного (изовекторного) гигантского спин-монополярного резонанса в $\beta^{(-)}$ -канале

(ИВГСМР⁽⁻⁾) в рамках частично-дырочной дисперсионной оптической модели, основанной на континуумной версии ПСФ (кПСФ). В указанной работе использованы реалистическое частично-самосогласованное феноменологическое среднее поле ядра и спин-изоспиновая часть сил Ландау-Мигдала (с безразмерной интенсивностью g'). Если величину g' выбрать из условия описания в рамках указанной модели наблюдаемой энергии ГТР в ядре ^{208}Bi , то энергия ИВГСМР⁽⁻⁾ в этом ядре оказывается заметно недооценённой (примерно на 3 МэВ). В представленной работе предпринята попытка разрешить это противоречие за счет учета как спин-изоспиновой части тензорных сил (с безразмерной интенсивностью g'_i), так и «несимметричного» приближения в уравнениях кПСФ [2], обусловленного существованием спин-орбитальной части среднего поля. Оба эффекта приводят к смешиванию 1^+ спин-монопольных и спин-квадрупольных возбуждений. Отметим учет тензорных сил в описании ГТ возбуждений, предпринятый в [3]. В представленной работе удастся разрешить отмеченное выше противоречие в рамках модифицированной модели при определённом выборе значений интенсивности спин-изоспиновой части центральных и тензорных сил.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-02-00660).

Список литературы

1. Г. В. Коломийцев, М. Г. Урин // Ядерная физика, 2020, том 83, №2, с. 119–125
2. М. Г. Урин, Релаксация ядерных возбуждений (Энергоатомиздат, Москва, 1991).
3. A. P. Severyukhin, H. Sagawa // Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 103D03 (10 pages).

И.Н. БОРЗОВ, С.В. ТОЛОКОННИКОВ

¹Национальный исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Москва, Россия,

²Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, Дубна, Россия;

³Физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

САМОСОГЛАСОВАННЫЙ ПОДХОД К ИЗОБАР-АНАЛОГОВЫМ РЕЗОНАНСАМ

Представлен полностью самосогласованный подход к описанию изобар-аналоговых резонансов (ИАР). Ядра вблизи заполненных нейтронных оболочек $N=20, 50, 82, 126$ рассчитываются в подходе энергетического функционала плотности и квазичастичного приближения случайной фазы (DF+CQRPA). Рассмотрены ядра, в которых одновременно имеется, как нейтронное, так и протонное спаривание. Показано, что новый функционал Фаянса DF3-f надежно описывает характеристики ИАР в длинных изотопических цепочках, включающих нейтронно-избыточные и нейтронно-дефицитные ядра.

I.N. BORZOV^{1,2}, S.V. TOLOKONNIKOV^{1,3}

¹National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

²Bogolubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia.

SELF-CONSISTENT STUDY OF ISOBARIC ANALOG RESONANCES

The fully self-consistent framework for isobaric-analog resonances is presented. The nuclei around the neutron shells at $N=20, 50, 82, 126$ including non-magic nuclei with pairing in both neutron and proton sectors are treated in the Density Functional plus Continuum Quasiparticle Random Phase Approximation (DF+CQRPA). The recently established new Fayans functional DF3-f gives a reliable description of the IAR in the long isotopic chains including the neutron-rich and neutron-deficient nuclei.

В данном кратком сообщении суммированы наши результаты [1] полностью самосогласованного подхода к описанию изобар-аналоговых резонансов (ИАР) в рамках обобщенной теории конечных ферми-систем, основанной на методе энергетического функционала плотности. Существующие в литературе полностью самосогласованные расчеты [2-4] ограничены, как правило, полумагическими ядрами. В развитом подходе рассмотрены ядра, в которых спаривание существует одновременно и в нейтронном и в протонном секторах. Для нового функционала DF3-f из анализа расщепления энергий связи изотопических дублетов и триплетов зеркальных ядер получены ограничения на силу обменного кулоновского взаимодействия (V_{ex}). Сравнение с расчетами в

релятивистском RQRPA [2,3] and SAMi+RPA [4] показывает преимущества DF+CQRPA подхода, использующего функционал Фаянса DF3-f.

Работы на начальной стадии были поддержаны грантом РФФ 16-12-10161.

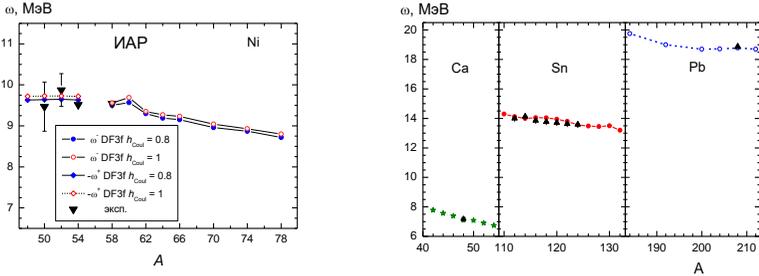


Рис.1 Энергии ИАР (относительно основного состояния Ni) в Co и Cu изотопах, рассчитанные с функционалом DF3-f для двух значений кулоновского параметра V_{Coul} . Энергии ИАР для нейтронно-дефицитных изотопов взяты из www.nndc.bnl.gov.

Рис.2 Сравнение с экспериментом энергий ИАР в референтных изотопах Ca, Sn, Pb, рассчитанных с DF3-f.

Список литературы

1. I. N. Borzov, S. V. Tolokonnikov - Physics of Atomic Nuclei 82, No.6, 743 (2019); Vol. 83, No. 1, 25-33(2020); Vol. 83, No. 4, 567-572 (2020).
2. N.Paar, T.Niksic, D.Vretenar, P.Ring, Phys.Rev. C 69, 054303 (2004).
3. Z.M. Niu, Y.F.Niu, H.Z.Liang, W.H.Long, J.Meng, Phys. Rev. C 95, 044301 (2017)
4. X. Roca-Maza, G. Col`o, H. Sagawa., Phys.Rev. C94, 044313 (2016).

М. Л. ГОРЕЛИК¹, М. Г. УРИН²

¹Московская экономическая школа, Москва, Россия

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

ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ 0⁺ ГИГАНТСКИХ РЕЗОНАНСОВ В ИЗОТОПАХ ОЛОВА

В рамках частично-дырочной дисперсионной оптической модели предложено описание основных характеристик изоскалярного и зарядово-обменных гигантских монополярных резонансов, а также изобарического аналогового резонанса в четных материнских ядрах ¹¹²⁻¹²⁴Sn и ¹³²Sn. Результаты расчетов сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

M. L. GORELIK¹, M. H. URIN²

¹Moscow Economic School, Moscow, Russia

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

A SEMIMICROSCOPIC DESCRIPTION 0⁺ GIANT RESONANCES IN TIN ISOTOPES

Within the semimicroscopic particle-hole dispersive optical model, a description of main characteristics of the isoscalar and charge-exchange giant monopole resonances, including isobaric analog resonance, in the even parent nuclei ¹¹²⁻¹²⁴Sn and ¹³²Sn is given. Calculation results are compared with available experimental data.

Полумикроскопическая частично-дырочная дисперсионная оптическая модель (ЧДДОМ) использована для описания основных характеристик изоскалярного и зарядово-обменных (изовекторных) гигантских монополярных резонансов (ИСГМР и ИВГМР([±]), соответственно), а также изобарического аналогового резонанса (ИАР) в дважды магическом материнском ядре ¹³²Sn и цепочке четных материнских ядер ¹¹²⁻¹²⁴Sn. Поскольку в рамках ЧДДОМ учитываются основные моды релаксации высоко-энергетических возбуждений типа частица-дырка, ассоциируемых с гигантскими резонансами (затухание Ландау, связь указанных возбуждений с одночастичным континуумом и многоквaziчастичными конфигурациями) [1], то указанная модель является эффективным инструментом изучения многообразия ГР в средне-тяжелых магических ядрах (см., например [2,3]). Для ИСМГР и ИВГМР([±]) (резонансов с "нормальным" спином) основными характеристиками являются усредненные по энергии силовые функции, и "проектированные" (одно-частичные) переходные плотности, отвечающие подходящим пробным операторам, а также вероятности прямого одно-нуклонного распада. Для ИАР (резонанса с

“аномальным” изоспином и потому обладающего малой полной шириной) основными релаксационными параметрами являются парциальные ширины прямого одно-протонного распада и фрагментационная ширина. В работе [2] предложено и на примере материнского ядра ^{208}Pb реализовано инкорпорированное в ЧДДОМ “Кулоновское описание” ИАР и ИВГМР(\pm), и в работе [3] для данного ядра предложено описание ИСМГР.

В работе на основе выполненных в [1-3] исследований предложены: 1) описание характеристик упомянутых выше резонансов в магическом материнском ядре ^{132}Sn ; 2) расширенная версия ЧДДОМ, в которой в “высоко-энергетическом пределе” учитывается спаривание нуклонов в средне-тяжелых четно-четных сферических материнских ядрах с незаполненными оболочками; 3) описание характеристик 0^+ гигантских резонансов в цепочке четных материнских ядер $^{112-124}\text{Sn}$ в рамках расширенной версии ЧДДОМ; 4) сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-02-00660)

Список литературы

1. Urin M. H. // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 044330.
2. Kolomiytsev G. V., Gorelik M. L. and Urin M. H. // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 228;
3. Gorelik M. L., Shlomo S., Tulupov B. A., and Urin M. H. // <https://arxiv.org/abs/2011.03315>, Phys. Rev. C. 2021. V. 103. (in print)

А.П. СЕВЕРЮХИН

Лаборатория Теоретической Физики им. Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ, Дубна, Россия

ШИРИНА ДВОЙНОГО γ -РАСПАДА ЯДЕРНОГО СОСТОЯНИЯ 2^+_1

Впервые оценена ширина двойного γ -распада ядерного состояния 2^+_1 четно-четного сферического ядра. Микроскопическая модель построена на функционале плотности энергии Скирма. Расчеты выполнены с учетом большого конфигурационного пространства. Рассматривая как пример ^{48}Ca , мы получили дипольную поляризуемость, обобщенную на случай двойного γ -распада, и оценили ширину двойного γ -распада относительно одинарного как 10^{-8} .

A.P. SEVERYUKHIN

Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR, Dubna, Russia

THE DOUBLE γ DECAY WIDTH OF A NUCLEAR 2^+_1 STATE

The competitive double γ decay of the 2^+_1 state of an even-even spherical nucleus is studied for the first time. The microscopic model based on the Skyrme energy density functional. The approach enables one to perform the calculations in very large configurational spaces. We estimate the generalized electric dipole polarizabilities involved in the $\gamma\gamma/\gamma$ decay process and make a prediction for the branching ratio of the competitive $\gamma\gamma$ -decay relative to its single γ -decay calculated to be 10^{-8} for the case of ^{48}Ca .

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.

Реакция $\gamma\gamma$ -распада является формально аналогичным без нейтринному процессу двойного β распада ($0\nu\beta\beta$), где в последнем две β -частицы и в первом два γ -кванта появляются в конечном состоянии и разделяют полную энергию ядерного перехода. В самом деле, процессы $\gamma\gamma$ -распада были впервые теоретически постулированы и изучены М.Гепперт-Майер в докторской диссертации [3], даже до обсуждения процессов $\beta\beta$ -распада. В то время как различные предсказания $0\nu\beta\beta$ -ядерных матричных элементов хорошо известны, пока нет возможности проверить точность теоретических расчетов. Удивительно обнаружить, что существует еще меньше данных о реакциях ядерного распада, который происходит во втором порядке по электромагнитному взаимодействию, где два γ -кванта одновременно испускаются в одном квантовом переходе. До недавнего времени $\gamma\gamma$ -распад в четно-четных ядрах был известен лишь в частном случае (^{16}O , ^{40}Ca , ^{90}Zr), когда первое возбужденное и основное состояние - 0^+ одинарный γ распад строго запрещен (смотри работу [4] и ссылки в ней).

Переход $E1E1$ с уровня $2s$ на уровень $1s$ в атоме водорода и водородоподобном ионе с небольшим Z является хрестоматийным примером для атомных систем. Это наиболее вероятный распад, который определяет время жизни уровня $2s$. Первая оценка была получена Брейтом и Теллером в работе [5]. Однако ядерный $\gamma\gamma$ -распад с доминирующим вкладом $E1E1$ еще не найден. В докладе мы обсуждаем такую ситуацию, в которой $\gamma\gamma$ -распад нижайшего квадрупольного состояния ядра происходит в условиях конкуренции с одинарным γ -распадом [6].

Используя микроскопические расчеты с функционалом плотности энергии Скирма, мы впервые исследовали $\gamma\gamma/\gamma$ распад состояния 2^+_{1} четно-четного ядра. В качестве примера мы рассмотрели ^{48}Ca , для которого дипольная поляризуемость была недавно измерена. Таким образом, можно ее сравнить с обобщенной поляризуемостью α_{LL} . Мы оценили ширину двойного γ распада относительно одинарного как 10^{-8} , которую можно экспериментально установить.

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. Göppert M., *Über Elementaraktentzwei Quantensprüngen* (Doctoral thesis, Universität zu Göttingen, 1930).
4. Kramp J. et al. // Nucl. Phys. A. 1987. Vol. 474, P. 412.
5. Breit G., Teller E. // Astrophys. J. 1940. Vol. 91, P. 215.
6. Severyukhin A.P., Arsenyev N.N., Pietralla N. // in preparation.

Д.А. ГОЖЕВ, С.Г. БОЧКАРЕВ, А.В. БРАНТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ

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

ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ МОЩНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ РЕКОРДНО КОРОТКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИЗ МИКРО-КЛАСТЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Рассмотрено взаимодействие короткого 10 фс лазерного импульса релятивистской интенсивности с микро-кластерной плазмой, в которой диаметр кластеров из золота значительно больше глубины скин-слоя. Показано, что стохастическая динамика электронов развивается в долгоживущих кулоновских полях микро-кластеров после прохождения лазерного импульса, при этом в энергетическом спектре электронов формируется плато, в котором содержится значительная часть ускоренных частиц и общей кинетической энергии ускоренных электронов.

D.A. GOZHEV, S.G. BOCHKAREV, A.V. BRANTOV, V.YU.
BYCHENKOV

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

LASER ACCELERATION OF ELECTRONS BY HIGH-POWER PULSES OF RECORD-BREAKING SHORT DURATION FROM MICRO-CLUSTER PLASMA

The interaction of a short 10 fs laser pulse of relativistic intensity with a micro-cluster plasma, in which the diameter of gold clusters is much greater than the depth of the skin layer, is considered. It is shown that the stochastic dynamics of electrons develops in long-lived Coulomb fields of micro-clusters after the passage of a laser pulse, while a plateau is formed in the energy spectrum of electrons, which contains a significant part of accelerated particles and the total kinetic energy of accelerated electrons.

Использование мишеней с ограниченной массой во взаимодействии с мощными ультракороткими фемтосекундными лазерными импульсами считается перспективным подходом для создания компактного универсального импульсного источника вторичного излучения. Инновационные мишени нано- и микроразмеров, такие как кластеры микронного размера, позволяют эффективно поглощать энергию лазера, генерировать электроны высокой энергии и, следовательно, поднять число ускоренных ионов, выхода рентгеновского излучения, вторичных нейтронов и т. д.

Также развитие лазерных технологий дало возможность реализовать в экспериментах лазерные импульсы с длительностью всего несколько единиц периодов световой волны (10-20 фс). И если взаимодействие с более длинными импульсами исследовано достаточно хорошо, то взаимодействия с веществом

для таких коротких интенсивных импульсов нуждается в детальном изучении с целью оптимизации характеристик ускоренных частиц.

В работе была проведена серия 3D PIC расчётов взаимодействия короткого фемтосекундного лазерного излучения релятивистской интенсивности в широком диапазоне от 2×10^{18} Вт/см² до (с длительностью импульса по полуширине $t_{FWHM} = 10$ фс при длине волны $\lambda_L = 1$ мкм). В расчетах лазерный импульс моделировался в плосковолновом приближении, а размер характерный расчетной области значительно меньше диаметра пятна фокусировки. Мишень представляла собой шары диаметром $0.2\lambda_L$ с электронной плотностью $n_e = 200n_{cr}$, где n_{cr} - критическая плотность плазмы, а плотность ионов $n_i = n_e/Z$, где $Z = 20$. В расчётной области они были расположены случайным образом, но так, чтобы среднее расстояние между центрами было равно $s = 1.2\lambda_L$, таким образом, средняя плотность была равна $0.48n_{cr}$.

Моделирование продемонстрировало, что после вырывания электронов из скин-слоя возникает сильное кулоновское поле, которое спадает обратно пропорционально квадрату расстояния от кластера, а максимальное значение этого поля в два раза выше амплитуды лазерной волны (при $I = 2 \times 10^{18}$ Вт/см²). Несмотря на то, что лазерный импульс достаточно быстро покидает область взаимодействия, максимальное значение кулоновского поля вследствие медленного расширения кластера спадает достаточно плавно. Так за 50 фс после момента, когда пик лазерного импульса покидает область взаимодействия, максимальное значение квазистационарного кулоновского поля спадает примерно в 2 раза. С помощью метода тестовых частиц и теории ляпуновских показателей было продемонстрировано, что электроны двигаются по сложным стохастическим траекториям в этих кулоновских полях. Были выявлены две группы ускоренных частиц: частицы, совершающие квазипериодическое движение (рециркулирующие), но движущиеся по незамкнутым траекториям, вблизи отдельных кластеров; а также частицы, блуждающие между кластерами. При этом после ухода лазерного импульса в энергетическом спектре происходит перераспределение частиц, уменьшается количество самых горячих электронов, однако, образуется достаточно широкое плато, диапазон энергий в котором зависит от интенсивности лазерного импульса (так при интенсивности $I = 2 \times 10^{18}$ Вт/см² плато располагается в интервале от 150 до 300 кэВ). Это плато содержит значительную часть горячих электронов, а также от 20% до 40% (с ростом интенсивности эта доля возрастает) от всей кинетической энергии, запасённой в электронах. Кроме того, при увеличении интенсивности лазерного импульса возрастает доля горячих частиц в расчётной области (с энергией больше 100 кэВ) и энергетический диапазон образовавшегося плато смещается в область больших энергий. Однако, оптимизация при фиксированной энергии лазера для получения наибольшего числа электронов с энергией больше 100 кэВ

показала, что большее число электронов получится при меньшей интенсивности лазера и большем пятне фокусировки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00023, а также стипендией Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (№ 17-21-2106-1) для Д.А. Гожева

А.М. ГРУДИНИНА¹, И.Л. КУРБАКОВ², Ю.Е. ЛОЗОВИК^{1,2},
Н.С. ВОРОНОВА¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия

РАВНОВЕСНАЯ БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИЯ ПОЛЯРИТОНОВ С ПОВЫШЕННОЙ ЭКСИТОННОЙ ФРАКЦИЕЙ

Рассмотрена система экситонных поляритонов с большими положительными отстройками (экситоноподобные поляритоны). В приближении Хартри-Фока-Боголюбова найдена зависимость критической температуры и длины свободного пробега в поляритонном бозе-газе от величины энергетической отстройки.

A.M. GRUDININA¹, I.L. KURBAKOV², Yu.E. LOZOVIK^{1,2},
N.S. VORONOVA¹

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²Institute for Spectroscopy, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia

EQUILIBRIUM BOSE-EINSTEIN CONDENSATION OF EXCITON- LIKE POLARITONS

We investigate equilibrium Bose-Einstein condensation of exciton-polaritons for large positive detunings (exciton-like polaritons). Haree-Fock-Bogoluibov approximation is applied to obtain the critical temperature and mean free path dependencies on the energy detuning for different values of the total polatiton density.

В полупроводниковых микрорезонаторах в режиме сильной связи между фотонами и экситонами возникают новые квазичастицы, называемые экситонными поляритонами. Из-за малой эффективной массы критические температуры бозе-конденсации для поляритонов становятся довольно высокими и могут достигать значений порядка сотен К и контролируются за счет величины отстройки:

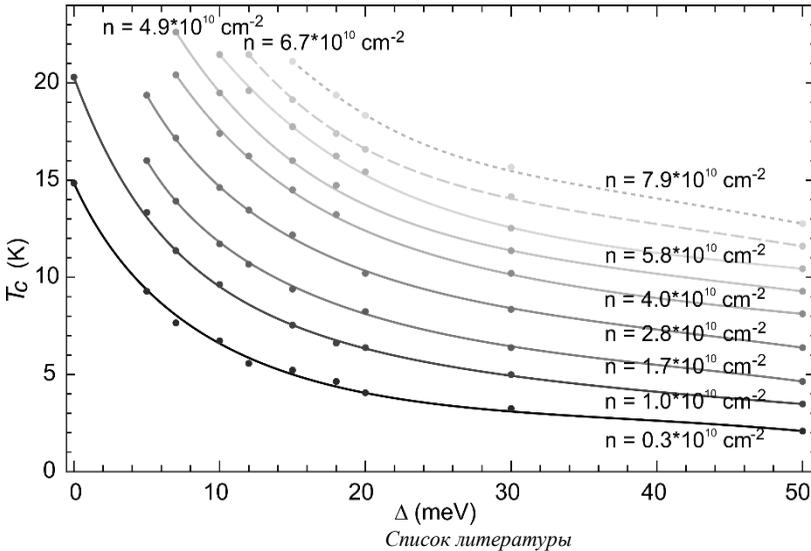
$$\frac{1}{m_{LP}} = \frac{1}{2m_{ph}} \left(1 - \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + \hbar\Omega_R^2}} \right), \quad (1)$$

где m_{ph} , m_{LP} – эффективные массы фотона в резонаторе и нижнего поляритона, соответственно, $\hbar\Omega_R$ – энергия расщепления Раби, $\Delta = E_{ph}^0 - E_g$ – энергетическая отстройка между фотонным и экситонным законами дисперсии. Несмотря на неравновесную природу поляритонов (система с накачкой и утечкой частиц), они ведут себя как слабовзаимодействующий бозе-газ и описываются в приближении Боголюбова [1]. Гамильтониан системы в предположении отсутствия верхних поляритонов:

$$\hat{H} = \sum_p \varepsilon_p P_p^+ P_p + \frac{1}{2} g \sum_p b_p^+ b_{p_1}^+ b_{p_2}^+ b_{p_3} b_{p_4} \delta_{p_1+p_2, p_3+p_4}, \quad (2)$$

где P_p^+ (P_p) и b_p^+ (b_p) – операторы рождения (уничтожения) нижнего поляритона и экситона, соответственно, где $b_p \approx X_p P_p$, в результате чего поляритон-поляритонное взаимодействие приобретает частичную зависимость от импульса даже если взаимодействие экситонов – контактное; X_p – коэффициент Хопфилда (X_p^2 задает долю экситона в нижнем поляритоне). Получены зависимости критической температуры перехода в бозе-конденсированное состояние (см. рис. 1) и средней длины свободного пробега частиц от величины отстройки для случая $1 - X_p^2 \ll 1$, когда время жизни поляритона $\tau \sim \tau_{ph}/(1 - X_0^2)$ оказывается длиннее времени термализации системы [2]. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-02-00793.

Рис. 1. Зависимость критической температуры от Δ для различных плотностей



1. Bogoliubov, N. N. On the theory of superfluidity. J. Phys. USSR **11**, 23–32 (1947).
2. Deng, H. et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 146402 (2006).

Ф.А. КОРНЕЕВ¹, К.А. МАТВЕЕВСКИЙ², J.J. SANTOS³

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

²*Университет Твенте, Энсхеде, Нидерланды*

³*Университет Бордо, Франция*

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО РАЗРЯДНОГО ИМПУЛЬСА ПО ТОНКОМУ ПРОВОДНИКУ

При облучении лазерными импульсами петаваттного класса протяжённых мишеней было обнаружено, что скорость распространения разрядного импульса заметно меньше, чем скорость света. Для объяснения этого явления предложена качественная модель, основанная на дисперсионном соотношении для бегущей по плазменному проводнику волны. В численных расчётах показано, что при распространении мощного импульса проводник заметно нагревается, что приводит к размытию его границы. Анализ дисперсионного соотношения показывает, что скорость распространения существенно зависит от температуры плазмы на поверхности. Поглощение при этом определяется бесстолкновительным затуханием Ландау.

Ph.A. KORNEEV¹, K.A. MATVEEVSKII², J.J. SANTOS³

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

²*University of Twente, Enschede, the Netherlands*

³*Bordeaux University, France*

ON PROPAGATION OF LASER-INDUCED DISCHARGE PULSE ALONG THIN CONDUCTOR

In experiments on irradiation of long targets by petawatt-class laser pulses it was observed, that the propagation velocity of discharge pulses is noticeably less, than the light velocity. For explanation of this phenomenon a qualitative model is proposed. It is based on the dispersion relation for a wave, propagating along a plasma conductor. In numerical simulations it is shown, that during the propagation of a powerful pulse the conductor strongly heats, which causes an expansion of its surface. Analysis of the dispersion relation shows, that the velocity of propagation considerably depends on plasma temperature on the surface, wherein absorption is defined by the collisionless Landau damping.

Один из методов оптической генерации магнитных полей основан на возбуждении в проводнике кольцевой формы разрядных токов. Величина этих токов определяется потенциалом в области воздействия лазерного импульса, то есть количеством быстрых электронов, покинувших мишень. В наносекундном режиме возбуждение разрядных токов происходит в квазистационарном режиме, поскольку длительность лазерного импульса существенно превосходит время распространения возмущения по лине проводника. В пикосекундном режиме, для достаточно протяжённых мишеней, длина которых превосходит несколько сотен микрон, оказываются существенными переходные процессы. В эксперименте по

генерации магнитных полей в пикосекундном петаваттном режиме [1] было обнаружено, что скорость распространения разрядного импульса заметно отличается от скорости света, что не может быть объяснено в рамках известных моделей.

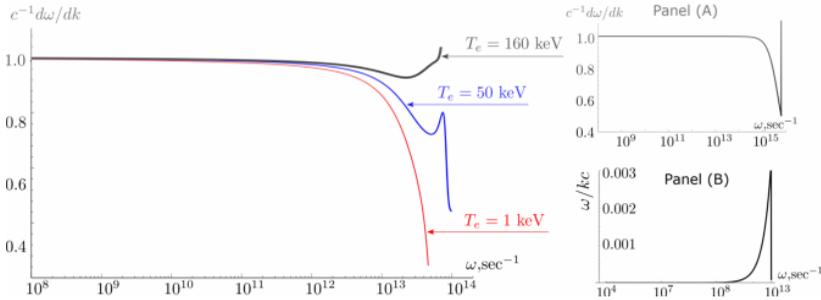


Рис. 1. Зависимость групповой скорости от частоты распространяющегося импульса для различных температур в предположении расширившейся плазмы на поверхности нагретого проводника (слева), и для холодной поверхности (панель А). Низкочастотная ветвь решения дисперсионного уравнения (панель В) .

Для анализа распространения разрядного импульса были рассмотрены уравнения Максвелла с диэлектрической проницаемостью горячей бесстолкновительной максвелловской плазмы. Полученное дисперсионное соотношение решалось с учётом наблюдаемого в численном расчёте методом частиц в ячейке нагрева и соответствующего размывания границы проводника. Для наблюдаемой плотности плазмы порядка 10^{18}см^{-3} построенные частотные зависимости показывают существенное замедление групповой скорости при приближении частоты к критической для данной плотности. Кроме того, показано, что ширина резонанса определяется в такой модели бесстолкновительным затуханием Ландау, так что для высоких температур резонанс оказывается более широким, см. Рис.1.

Список литературы

1. M. Ehret, M. Bailly-Grandvaux, Ph. Korneev and others// in preparation.

Д.И. ТЮРИН¹, С.В. ПОПРУЖЕНКО^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия ²
ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ИОНИЗАЦИИ ПО ВЕЛИЧИНЕ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОГО ИМПУЛЬСА ФОТОЭЛЕКТРОНА

В рамках модельного подхода исследована связь между моментом туннелирования электрона из атома в интенсивном циркулярно поляризованном лазерном поле и величиной наиболее вероятного импульса этого электрона. Показано, что при произвольной форме электрического поля лазерной волны $\mathbf{E}(t)$ наиболее вероятный момент ионизации не совпадает с моментом времени t_m , в который поле достигает максимума. Это означает, что методы определения «времени туннелирования» путем измерения спектров нелинейной фотоионизации содержат существенную неконтролируемую неопределенность.

D.I. TYURIN¹, S.V. POPRUZHENKO^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

ON THE POSSIBILITY OF DETERMINATION OF THE IONIZATION TIME INSTANT USING THE MOST PROBABLE VALUE OF THE PHOTOELECTRON MOMENTUM

We studied the relation between the time instant associated with the event of tunneling of the electron from an atom subject to an intense circularly polarized laser field and the most probable momentum of this electron. This relationship was examined within a model approach. We showed that for an electric field of arbitrary time profile $\mathbf{E}(t)$ the most probable instant of ionization generally does not coincide with the time instant t_m when the electric field reaches its maximum. This means that the methods for determination of the “tunneling time” through the measurement of the nonlinear ionization spectra, suffer from a considerable uncontrollable uncertainty.

Вопрос о возможности экспериментального измерения времени туннелирования электрона сквозь потенциальный барьер, создаваемый атомными силами и внешним сильным электрическим полем, активно обсуждается в последние годы в контексте ионизации атомов интенсивными лазерными импульсами [1-3]. Предложено несколько концепций, рамках которых время туннелирования (а) не является физически наблюдаемой величиной; (б) принципиально могло бы быть измерено, но равно нулю; (в) измеримо и отлично от нуля.

Концепции, обосновывающие возможность измерения времени туннелирования, основаны на квазиклассических моделях, описывающих процесс ионизации как результат движения электрона вдоль траектории, удовлетворяющей уравнениям Ньютона в вещественном или комплексном времени и пространстве (см. обзор [4] и цитируемую в нем литературу). Как правило, при этом предполагается, что туннелирование электрона происходит с наибольшей вероятностью в момент времени t_m , в который электрическое поле $E(t)$ лазерного импульса максимально по величине. Исходя из этого предположения, можно найти величину наиболее вероятного импульса фотоэлектрона. Тогда отклонение наблюдаемого наиболее вероятного импульса от рассчитанного в рамках модели можно интерпретировать как результат временной задержки, которая может быть связана, в том числе, с конечным временем туннелирования.

В данной работе, используя представление о квазиклассических траекториях, на котором основана большая часть расчетов времени туннельной задержки, мы показываем, что такая постановка задачи не может привести к обоснованному заключению. Рассматривая ионизацию атома интенсивным циркулярно поляризованным лазерным импульсом с временной огибающей, мы показываем, что наибольшая вероятность ионизации не всегда отвечает максимуму электрического поля. Однозначное соответствие между моментом времени t_m и импульсом p_m возникает только в ряде специальных случаев, например, для симметричной временной огибающей. Для огибающей произвольного вида временная задержка между моментом максимума поля и моментом времени, в который максимума достигает вероятность туннелирования, составляет, по порядку величины, около 0.1 оптического периода. Такая величина временного сдвига сравнима с временем туннелирования, извлекаемом из экспериментальных измерений, или даже превосходит его. На основании полученного результата мы делаем вывод о том, что измерение величины наиболее вероятного импульса фотоэлектрона не может быть использовано для определения времени туннелирования.

Список литературы

1. Orlando G, McDonald C.R., Protic N.H., Vampa G. and Brabec T. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2014. Vol. 47. P. 204002.
2. Maquet A., Caillat J. and Taieb R. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2014. Vol. 47. P. 204004.
3. Sainadh U.S., Sang R.T., Litvinyuk I.V. // J. Phys. Photonics. 2020. Vol. 2. P. 042002.
4. Popuzhenko S.V. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2014. Vol. 47. P. 204001.

Е.Б. КАЛЫМБЕТОВ¹, С.В. ПОПРУЖЕНКО^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия ²
ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ИЗЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ИОНИЗАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ СВЕРХСИЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЕМ

Исследовано излучение быстрых электронов, возникающих при многократной туннельной ионизации тяжелых атомов в фокусе лазерного импульса сверхвысокой интенсивности $>10^{21}$ Вт/см². Показано, что в широком диапазоне углов спектрально-угловое распределение рентгеновских фотонов определяется формулами синхротронного излучения. Полученный результат может быть использован для оценки величины интенсивности в центре лазерного фокуса.

E.B. KALIMBETOV¹, S.V. POPRUZHENKO^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

²Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

RADIATION OF ULTRARELATIVISTIC ELECTRONS IN THE PROCESS OF IONIZATION OF HEAVY ATOMS BY A SUPERINTENSE LASER FIELD

We studied radiation of fast electrons created in the process of multiple tunneling ionization of heavy atoms in the focus of a high-power laser beam of ultrahigh intensity $>10^{21}$ W/cm². We show that in a wide range of emission angles, the distribution of X-ray photons can be described using the theory of synchrotron radiation. The obtained results can be applied for estimation of the laser intensity value in the focal spot center.

В настоящее время в нескольких лабораториях введены в строй лазерные установки мощностью около 10ПВт [1-3]. Использование петаваттных лазерных пучков позволит исследовать эффекты взаимодействия электромагнитного излучения с веществом при интенсивностях около 10^{23} Вт/см². Планируемое в обозримом будущем достижение экзаваттных мощностей [4] позволит перейти к интенсивностям 10^{25} Вт/см² и выше. Одной из важных задач, решение которой необходимо для планирования новых экспериментов на сверхмощных лазерах, является разработка методов диагностики лазерного излучения экстремальной интенсивности. В работах [5,6] был теоретически исследован метод измерения интенсивности в центре лазерного фокуса, основанный на наблюдении многократной туннельной ионизации атомов благородных газов.

В данной работе мы рассматриваем излучение, возникающее при ионизации атомов в сверхсильном лазерном поле. При интенсивностях излучения 10^{21} –

10^{23} Вт/см² ионизация атомов в разреженной газовой мишени происходит каскадно и в режиме квазистатического туннелирования [5]. При этом электроны образуются в центральной части фокуса с нулевой начальной скоростью, а затем движутся под действием неоднородного электромагнитного поля лазерной волны, покидая область высокой интенсивности через боковую поверхность фокуса. Анализ уравнений движения показал, что при рассматриваемых интенсивностях и длине волны лазерного излучения около 1мкм траекторию электрона с хорошей точностью можно описывать в приближении скрещенного поля. При этом на значительной части траектории конус излучения оказывается узким по сравнению с углом поворота скорости за время выхода электрона из лазерного фокуса. Это позволяет использовать для расчета спектрально-углового распределения излученных фотонов хорошо известные формулы теории синхротронного излучения.

С использованием такого подхода были рассчитаны спектрально-угловые распределения излучения, возникающего при выходе электрона из фокуса гауссова пучка интенсивностью $2 \cdot 10^{22}$ Вт/см². Сравнение результатов расчетов, выполненных в приближении скрещенного поля и с использованием траекторий, найденных численным решением уравнений движения, показало, что точность приближения скрещенного поля достаточно высока для траекторий, начинающихся вблизи центра фокуса. Полученные результаты могут быть использованы для оценки интенсивности лазерного излучения в центре фокуса в рамках экспериментальной схемы, исследованной в [5,6].

Список литературы

5. Weber S., Bechet S., Borneiset S., et al. // *Matt. Rad. Extr.* 2017. Vol. 2. P. 149
6. Li W., Gan Z., Yu L., et al. // *Opt. Lett.* 2018. Vol. 43. P. 5681.
7. Sung J.H., Lee H.W., Yoo J.Y. et al. // *Opt. Lett.* 2017. Vol. 42. P. 2014.
8. Bashinov A.V., Gonoskov A.A., Kim A.V. et al. // *Eur. Phys. J.: Spec. Top.* 2014. Vol. 223. P. 1105.
9. Ciappina M.F., Popruzhenko S.V., Bulanov S.V., Ditmire T., Korn G. and Weber S. // *Phys. Rev. A.* 2019. Vol. 99. P. 043405.
10. Ciappina M.F., Peganov E.E., Popruzhenko S.V., // *Matt. Rad. Extr.* 2020. Vol. 5. P. 044401.

М.А. ПОСАЖЕНКОВ, Н.С. ВОРОНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ПОДОГРЕВА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ НА ДИНАМИКУ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОГО КОНДЕНСАТА

Рассматривается система уравнений Гинзбурга-Ландау для экситонной и фотонной конденсатных волновых функций в случае резонансной накачки в различных режимах (различной энергии, ширины и длительности). Исследуется влияние локального подогрева кристаллической решетки с учетом запаздывания и медленной тепловой релаксации на пространственно-временную динамику экситон-поляритонного бозе-конденсата (эффект коллективного полярона).

М.А. POSAZHENKOV, N.S. VORONOVA

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

EFFECT OF THE LOCAL LATTICE HEATING ON THE DYNAMICS OF AN EXCITON-POLARITON CONDENSATE

We consider a set of coupled Ginzburg-Landau equations describing exciton and photon condensate wave functions in presence of resonant pump in different regimes (laser energy, spread, and duration), exploring the effect of local retarded heating of the crystal lattice and thermal relaxation on the spatio-temporal dynamics of the exciton-polariton Bose condensate (the collective polaron effect).

Экситонные поляритоны в микрорезонаторе – это полупроводниковая система, позволяющая наблюдать различные коллективные бозонные эффекты, такие как бозе-конденсация, сверхтекучесть и др. В экспериментальной работе [1] докладывалось об эффекте поляритонной самолокализации. Авторы наблюдали, что, несмотря на отталкивательные взаимодействия, поляритонный конденсат через некоторое время после накачки образует поток, направленный к центру пятна накачки, после чего частицы локализируются в небольшой (по сравнению с областью накачки) области, где остаются в течение продолжительного времени. В [1] обсуждается возможный механизм подобной самофокусировки системы: большие плотности экситонов разогревают кристаллическую решетку полупроводника, так как усиливается экситон-фононное взаимодействие и поляритонный эффект Оже. Из-за подогрева решетки происходит сужение запрещенной зоны, что эффективно меняет экситон-фотонную отстройку и приводит к красному смещению нижней ветви поляритонной дисперсии. Данный процесс учитывается локально (в каждой точке системы), с учетом запаздывания по времени по сравнению с увеличением

экситонной плотности в системе и тепловой релаксации кристаллической решетки:

$$\Delta E(r, t) = -\frac{b}{T_R} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_R}\right) |\psi_{ex}(r, \tau)|^4 d\tau, \quad (1)$$

где b – фитирующий параметр, T_R – время тепловой релаксации, ψ_{ex} – макроскопическая волновая функция экситонной компоненты поляритонного конденсата. Данная работа посвящена теоретическому исследованию влияния создаваемого эффективного удерживающего потенциала (эффекта коллективного полярона) на временную динамику системы в различных режимах (на рис. 1 показано моделирование для разных накачек).

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00793.

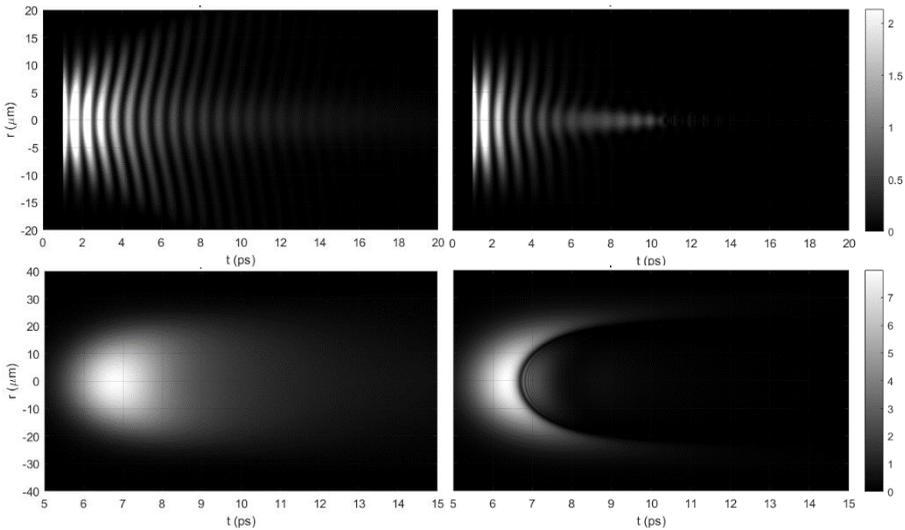


Рис. 1. Временная динамика поляритонного конденсата в отсутствии (слева) и в присутствии (справа) локального подогрева решетки согласно формуле (1). Сверху: фемтосекундная накачка на энергии фотонов в микрорезонаторе; внизу: пикосекундная накачка на энергии нижнего поляритона

Список литературы

1.L. Dominici, M. Petrov, M. Matuszewski et al., Nat. Commun. **6**, 8993 (2015).

М.А. РАКИТИНА^{1,2}, А.В. БРАНТОВ¹

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ИОННО-ЗВУКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ПЛАЗМЕ С ДВУМЯ СОРТАМИ ИОНОВ

В данной работе исследовались вопросы возникновения ионно-звуковой неустойчивости в короне лазерной плазме термоядерного синтеза с двумя сортами ионов. Рассмотрен бесстолкновительный случай для двух веток ионно-звуковых колебаний: быстрый и медленный звук.

M.RAKITINA^{1,2}, A. BRANTOV²

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

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

ION-ACOUSTIC INSTABILITY IN A PLASMA WITH TWO TYPES OF IONS

In this paper we investigated the issues of the appearance of ion-acoustic instability in a laser fusion plasma with two types of ions. The collisionless case of fast and slow sound branches is studied.

Для моделирования реальных физических процессов необходимо учитывать сложный состав плазмы с несколькими сортами ионов. Так, в качестве аблятора в ЛТС схеме прямого облучения используют пластик, который состоит из ионов двух сортов: углерод и водород. Описание звуковых колебаний в плазме с двумя сортами ионов осложняется существованием двух веток колебаний, называемых медленным и быстрым звуком [1], существование которых доказано экспериментально[2]. Решение дисперсионного выражение для бесстолкновительной плазмы, записанное в пределе $\omega \ll kv_{Te}$. $\varepsilon = 1 + \frac{1}{(kr_{de})^2} + \left(\frac{\omega_1}{kv_{T1}}\right)^2 W\left(\frac{\omega}{kv_{T1}}\right) + \left(\frac{\omega_2}{kv_{T2}}\right)^2 W\left(\frac{\omega}{kv_{T2}}\right) = 0$, определяет закон дисперсии $\omega(k) = Re[\omega]$ и затухание $\gamma = -Im[\omega]$ быстрой и медленной звуковых волн. Сравнение аналитических решений, полученных в пределах холодных тяжелых ионов ($\omega \gg kv_{T1,2}$) для быстрой звуковой волны и одного сорта легких ионов ($kv_{T2} \gg \omega \gg kv_{T1}$) для медленного звука с численными расчетами для СН и СН2 плазмы, показывает (см. Рис. 1), что аналитические выражения могут использоваться для описания ионно-звуковых волн только в узком диапазоне параметров плазмы.

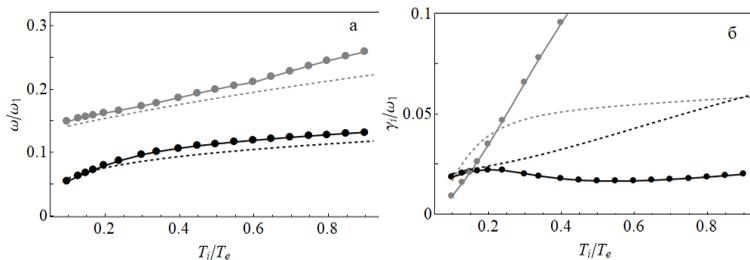


Рис. 1. Частота и затухание быстрой (серые кривые) и медленной (черные кривые) звуковых волн для CH₂-плазмы с Z1=6 для $kr_{de} = 0.1$. Пунктирные кривые отвечают приближенным формулам.

Используя точные решения дисперсионного выражения, получены условия возникновения ионно-звуковой неустойчивости из-за изменения знака затухания γ при увеличении параметра δ , характеризующего профиль (градиент) электронной температуры [3] (см. Рис.2).

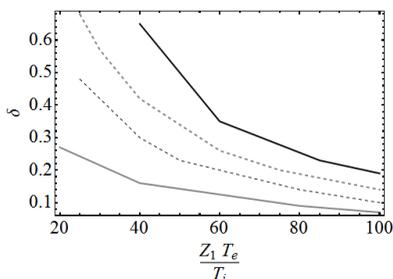


Рис. 2. Зависимость порогового значения δ от отношения температур для раскочки неустойчивости на быстром звуке для CH- (черные кривые) и CH₂ плазмы (серые кривые) для Z = 6 (сплошные кривые) и Z = 4 (пунктирные кривые).

Показано, что для возбуждения неустойчивости в CH плазме требуются достаточно резкие градиенты температуры, сравнимые с длиной свободного пробега электронов, и неизотермичность плазмы (электронная температура много больше ионной).

Список литературы

1. V.Yu Bychenkov, W. Rozmus, V.T. Tikhonchuk // Phys. Rev. E. 1995. V. 51. P. 1400.
2. S. H. Glenzer, C. A. Back, K. G. Estabrook, et al, Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 1496.
3. W. Rozmus, A.V. Brantov, M. Sherlock, V.Y. Bychenkov // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. P. 014004. doi:10.1088/1361-6587/aa868d.

С.А. СУББОТИН¹, Н.С. ВОРОНОВА¹, Ю.Е. ЛОЗОВИК^{1,2}

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

²*Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ РЕШЕТОК ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННЫХ КОНДЕНСАТОВ

Рассмотрена система взаимодействующих экситон-поляритонных конденсатов в решеточной геометрии с утечкой и накачкой. Проведено исследование уравнения Гросса-Питаевского, учитывающего пространственную модуляцию профиля накачки. Получено численное решение для динамики волновой функции решетки возбужденных конденсатов. Изучено поведение решения уравнения Гросса-Питаевского и времени переключения сети в зависимости от мощности накачки.

S.A. SUBBOTIN¹, N.S. VORONOVA¹, Yu.E. LOZOVIK^{1,2}

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

²*Institute for Spectroscopy, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia*

EXCITON-POLARITON CONDENSATE LATTICES SWITCHING TIME DYNAMICAL CONTROL

A driven-dissipative system of interacting exciton-polariton condensates is considered in a lattice geometry. The corresponding Gross-Pitaevskii equation is investigated to account for the specific spatial pump profile. The wave function dynamics of excited exciton-polariton condensate lattice is numerically simulated. Behavior of the Gross-Pitaevskii equation solution and the associated network switching time is studied a function of the pump intensity.

Экситонные поляритоны могут рассматриваться как идеальные аппаратные платформы для реализации искусственных нейронных сетей. Стандартные компьютеры имеют ряд недостатков – требуют огромного количества вычислительных ресурсов и концептуально ограничены архитектурой фон Неймана, – поэтому физическая или аппаратная реализация нейронных сетей призвана решить данную проблему. Как вариант реализации искусственной платформы для резервуарных вычислений было предложено рассмотреть решетку неравновесных конденсатов экситонных поляритонов с накачкой и утечкой. В работе [1] было показано теоретически, что системы конденсатов экситонных поляритонов обладают всеми присущими нейронным сетям свойствами. В теоретической работе [2] было непосредственно получены численные решения уравнения Гросса-Питаевского (УГП) для решетки неравновесных конденсатов экситонных поляритонов с накачкой и утечкой. В основу рассмотрения данной работы был взят эксперимент итальянских коллег 2020 года [3].

Решетку когерентных бозе-конденсатов можно описывать с помощью связанных УГП (1), содержащих члены, описывающие скорости накачки для каждого узла, линейный и нелинейный распад и поляритонное взаимодействие, причем такие связанные УГП записаны для каждого узла решетки с феноменологически введенными константами связи между каждой парой узлов:

$$i\hbar \frac{d\psi_j}{dt} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \alpha |\psi_j|^2 - i\frac{\gamma}{2} + V_j(\mathbf{r})\right)\psi_j + F_j(\mathbf{r}) - \sum_i w_{ij}\psi_i, \quad (1)$$

где ψ_j – макроскопическая волновая функция j -го конденсата, m – эффективная масса поляритона, α – константа взаимодействия поляритонов внутри одного узла, γ – скорость распада, $V_j(\mathbf{r})$ – внешний потенциал j -го узла, $F_j(\mathbf{r})$ – резонансная лазерная накачка j -го узла, w_{ij} – константы связи между различными конденсатами в решетке.

Численное моделирование такой системы позволит подобрать параметры нейронной сети на основе решетки конденсатов экситонных поляритонов для последующей экспериментальной реализации и усовершенствования архитектуры сети. В работе исследуется время переключения системы (выход на стационарный режим после импульсной накачки) в зависимости от формы и интенсивности $F_j(\mathbf{r})$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках совместного с Национальным исследовательским советом Италии научного проекта № 20-52-7816.

Список литературы

1. T. Espinosa-Ortega and T. C. H. Liew, Phys. Rev. Lett. **114**, 118101 (2015).
2. A. Opala et al., Phys. Rev. Appl. **11**, 064029 (2019).
3. D. Ballarini et al., Nano Lett. **20**, 3506–3512 (2020).

С.И. ГЛАЗЫРИН, К.Е. ГОРОДНИЧЕВ, П.П. ЗАХАРОВ,
С.Е. КУРАТОВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,
Москва, Россия*

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МИШЕНЕЙ ЛТС ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Рассмотрена устойчивость сжатия мишеней прямого облучения лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), предложенных для российской установки мегаджоульного уровня. Получен критерий на уровень шероховатости границы лёд-аблятор, при которой сохраняется симметричность сжатия. Рассмотрен эффект нелокальной теплопроводности и показано его влияние на динамику мишени.

S.I. GLAZYRIN, K.E. GORODNICHEV, P.P. ZAKHAROV,
S.E. KURATOV

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

HYDRODYNAMICAL STABILITY OF DIRECT DRIVE ICF TARGETS

The hydrodynamical stability of direct drive ICF targets, proposed for Russian Megajoule Facility, is considered. The value of ice-ablator interface roughness amplitude, that keep symmetrical compression, is presented. The influence of the nonlocal heat transport effect on target dynamics is discussed.

Мишень ЛТС прямого облучения, предложенная для российской установки мегаджоульного уровня [1], реализует схему искрового зажигания. Серия ударных волн, возникающих вследствие непосредственного облучения мишени, формирует в момент максимального сжатия в центре мишени горячую область, окруженную плотным слоем топлива. Высокие степени сжатия такой мишени требуют высокую степень начальной симметрии мишени. Даже небольшие отклонения от неё могут значительно снизить параметры плазмы (плотность, давление) на момент максимального сжатия, что скажется на эффективности горения [2]. Наибольшую опасность представляют начальные возмущения границы лёд-аблятор, так как она подвержена неустойчивости Рэля-Тейлора даже на стадии сжатия мишени. В работе с использованием численного моделирования получен критерий на максимальную амплитуду шероховатости данной границы.

Использование схемы прямого облучения приводит к более вероятному развитию в короне лазер-плазменных неустойчивостей. Хорошо известно [3],

что такие неустойчивости имеют набор нежелательных последствий для зажигания: в результате их развития часть падающей энергии может быть отражена, и, тем самым, потеряна для мишени, а часть преобразована в горячие электроны. Последние приводят к предпрогреву центральной области мишени, что поменяет адиабату сжатия и сделает его менее эффективным. Для мишеней прямого облучения характерен ещё один источник горячих электронов, с меньшей, чем для неустойчивостей, энергией. Высокие градиенты температуры, возникающие на фронте тепловой волны, вместе с высокими температурами в короне, приводят к эффекту нелокальной теплопроводности, при котором тепловой поток начинает зависеть от параметров в плазме, распределённых по некоторому объёму. В результате, при распространении тепловой волны, возникают хвосты предпрогрева, которые оказывают влияние на эффективность сжатия мишени. В работе представлено влияние этого эффекта на динамику мишени, посчитанное в гидродинамическом приближении с использованием моделей нелокальной теплопроводности.

Список литературы

1. Бельков С.А., Бондаренко С.В., Вергунова Г.А. и др. // ЖЭТФ. 2015. Т. 148. С. 784.
2. Peterson J., Johnson B., Naan S. // Phys. Plasmas. 2018. Vol. 25. P. 092705.
3. Rinderknecht H.G., Amendt P.A., Wilks S.C. et al. // Plasm. Phys. Contr. Fus. 2018. V. 60. P. 064001.

С.Е. КУРАТОВ, Ю.Е.ЛОЗОВИК

*Москва, Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Автоматики им.
Н.Л. Духова*

МОДИФИКАЦИЯ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КЛАСТЕРАХ, ВЫЗВАННАЯ НАЛИЧИЕМ КРУПНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАСШТАБА НЕОДНОРОДНОСТИ

В работе проведен теоретический анализ колебаний системы вырожденных электронов в металлических субмикронных кластерах с учетом наличия крупного масштаба пространственной неоднородности, вызванного квантовыми оболочечными эффектами. Анализ проводится в рамках формализма кинетического уравнения Больцмана. Получено модифицированное дисперсионное уравнение. Анализируется возможность экспериментального наблюдения эффекта.

S.E. KURATOV, Y. E. LOZOVIK

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

MODIFICATION OF THE ELECTRONIC OSCILLATIONS SPECTRUM IN METALLIC CLUSTERS, CAUSED BY THE PRESENCE OF A LARGE SPATIAL SCALE OF INHOMOGENEITY

The paper presents a theoretical analysis of the oscillations of a system of degenerate electrons in metallic submicron clusters, taking into account the presence of a large scale spatial inhomogeneity caused by quantum shell effects. The analysis is carried out within the framework of the Boltzmann kinetic equation formalism. A modified dispersion equation is obtained. The possibility of experimental observation of the effect is analyzed.

В [1] был обнаружен эффект наличия двух масштабов неоднородности в распределении макроскопического числа свободных электронов в сферической яме. Результат был получен аналитически с помощью метода функций Грина и подтвержден численными расчетами. Анализ нового неожиданного эффекта - эффекта существования крупного пространственного масштаба в распределении макроскопического числа вырожденных электронов в ограниченной системе проведен для двух систем. Для системы свободных невзаимодействующих электронов в основном состоянии в сферически симметричной потенциальной яме с непроницаемыми (т.е. бесконечно высокими) стенками при наличии положительного ионного фона.. И для реалистичной системы - для холодного сжатого газового пузыря субмикронного размера.

Для обеих систем было показано, что функция распределения электронов обладает крупным пространственным масштабом, который порядка размера системы и значительно больше другого пространственного масштаба - фермиевской длины электрона.

В настоящей работе анализируется возможное влияние эффекта на спектр колебаний системы вырожденных электронов в металлических субмикронных

кластерах. Анализ проводится в рамках формализма кинетического уравнения Больцмана. Получено модифицированное дисперсионное уравнение. Анализируется возможность экспериментального наблюдения эффекта

Список литературы

[1] Kuratov S E, Shidlovski D S and Blinnikov S I 2018 Physics of Plasmas. 2019. Feb. T. 26, №2. С. 022709

К.Е. ГОРОДНИЧЕВ, С.И. ГЛАЗЫРИН, П.П. ЗАХАРОВ, С.Е. КУРАТОВ
*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н.Л. Духова», Москва,
Россия*

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ УСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

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, P.P. ZAKHAROV, S.E.
KURATOV

Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, Russia

STABILITY OF THE ACCELERATED CONTACT BOUNDARY IN THE PRESENCE OF DENSITY PERTURBATIONS

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, но до сих пор не превзошли его. Зажигание должно происходить за счёт сферического сжатия газовой смеси (DT), окружённой DT льдом.

На текущий момент достичь зажигания не удаётся. Считается, что это связано с неконтролируемым ростом гидродинамических неустойчивостей [2], которые усиливают начальные возмущения поверхности термоядерной капсулы, её креплений, трубки для закачки DT-газа, а также асимметрии облучения, вызываемой развитием лазер-плазменных неустойчивостей.

В данной работе представлены результаты теоретического анализа неустойчивости контактной границы двух сред при наличии ускорения в двухмерной постановке. При этом в одной из сред присутствует начальное поле возмущений плотности. С использованием преобразований Лапласа в рамках линейного приближения определены параметры сред.

Рассматриваются начальные значения давления достаточные для того, чтобы можно было ограничиться рассмотрением гидродинамического приближения и

не учитывать упруго-пластические свойства вещества. Наличием поверхностного натяжения также пренебрегаем.

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

А.Б. КУКУШКИН^{1,2}, В.С. НЕВЕРОВ², Р.И. ХУСНУТДИНОВ^{1,2}

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

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

АЛГОРИТМЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЦИКЛИНГА ВОДОРОДА К ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ ТОКАМАК

Представлены алгоритмы применения баллистической модели (БМ) рециклинга водорода в основной вакуумной камере токамака к Н-альфа диагностике нейтрального водорода и перезарядочной рекомбинационной спектроскопии ионов примеси. БМ является простой, вычислительно эффективной моделью, позволяющей рассчитывать функции распределения по скоростям (ФРС) атомов и молекул изотопов водорода в пристеночной плазме путем итеративного решения кинетического уравнения для ФРС атомов и упрощенного решения кинетического уравнения для ФРС молекул. Разрабатываемая модель BM1D2V, одномерная по координате ортогонально стенке и двумерная по скорости атомов, может быть использована при восстановлении плотности потока нейтрального водорода со стенки в плазму по сигналам на хордах наблюдения под косыми углами к первой стенке и при расчете пассивной перезарядки ионов примеси на атомах водорода.

A.B. KUKUSHKIN^{1,2}, V.S. NEVEROV², R.I. KHUSNUTDINOV^{1,2}

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

²*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation*

ALGORITHMS OF APPLICATION OF THE BALLISTIC MODEL OF HYDROGEN RECYCLING TO DIAGNOSTICS OF TOKAMAK PLASMAS

Algorithms for applying the Ballistic Model (BM) of hydrogen recycling in the main vacuum chamber of a tokamak to H-alpha diagnostics of neutral hydrogen and Charge Exchange Recombination Spectroscopy of impurity ions are presented. BM is a simple, computationally efficient model that allows one to calculate the velocity distribution function (VDF) of atoms and molecules of hydrogen isotopes in the near-wall plasma by iteratively solving the kinetic equation for the VDF of atoms and a simplified solution of the kinetic equation for the VDF of molecules. The developed BM1D2V model, one-dimensional in the coordinate orthogonal to the wall and two-dimensional in the velocity of atoms, can be used to reconstruct the density of the neutral hydrogen flux from the wall to the plasma from signals on lines of sight observing the first wall at oblique angles, and also to calculate the passive charge exchange of impurity ions with hydrogen atoms.

В ряде задач диагностики плазмы токамака требуется знание функции распределения по скоростям (ФРС) нейтральных атомов водорода, которая, как известно, может значительно отличаться от максвелловской. В Н-альфа

диагностике нейтрального водорода регистрируемый спектр является интегралом ФПС, с учетом доплеровского уширения спектральной линии, по хорде наблюдения (см., напр., синтетическую H-альфа диагностику для ИТЭР [1], в которой использованы результаты численного моделирования методом Монте-Карло кодом EIRENE [2] для условий периферийной плазмы в ИТЭР, смоделированных кодом SOLPS4.3 [3]). В перезарядочной рекомбинационной спектроскопии (Charge Exchange Recombination Spectroscopy, CXRS) ионов примеси для расчета фонового сигнала от т.н. пассивной перезарядки ионов примеси на атомах водорода в пристеночной плазме (а не в диагностическом водородном пучке быстрых атомов) нужен расчет заселения перезарядкой излучающих состояний ионов (см. расчеты [4] для ИТЭР, использующие результаты EIRENE [2]).

Баллистическая модель (БМ) [5,6] способна заменить моделирование кодом EIRENE [2] в диагностике H-альфа в основной камере токамака (БМ верифицирована путем сравнения с результатами EIRENE), что намного ускорит решение обратных задач в синтетической H-альфа диагностике для ИТЭР [1] и при интерпретации экспериментов, например, после усовершенствования методики, использованной в [7] для токамака JET. Для этого однако следует обобщить БМ [5,6] на случай двумерного распределения по скорости атомов. Это делается в разрабатываемой модели BM1D2V.

В настоящей работе представлены алгоритмы применения модели BM1D2V к H-альфа диагностике нейтрального водорода и CXRS-диагностике ионов примеси в основной вакуумной камере токамака.

Список литературы

1. A.V. Kukushkin, V.S. Neverov, A.G. Alekseev, S.W. Lisgo, A.S. Kukushkin. Fusion Sci. Tech., 2016, 69 (3), 628-642.
2. D. Reiter, M. Baelmans and P. Boerner, Fusion Sci. Tech., 2005, 47, 172-186.
3. A.S. Kukushkin et al. 2011 Fusion Eng. Des. 86 2865
4. П.А. Сдвиженский, М.Г. Левашова, А.Б. Кукушкин, В.С. Лисица, В.С. Неверов, Ю.А. Ромазанов, С.В. Серов, И.Ю. Толстихина, С.Н. Тугаринов. Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 27-38, http://vant.iterru.ru/vant_2020_4/3.pdf
5. M.B. Kadomtsev, V. Kotov, V.S. Lisitsa, V.A. Shurygin. 2012 Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2-6 July 2012), P4.093
6. A.B. Kukushkin, A.S. Kukushkin, V.S. Lisitsa, V.S. Neverov, A.A. Pshenov, V.A. Shurygin 2021 Plasma Phys. Control. Fusion 63 035025
7. V.S. Neverov, A.B. Kukushkin, M.F. Stamp, A.G. Alekseev et al. 2017 Nucl. Fusion 57 016031

А.В. БЕРЕЗИН¹, А.А. МИРОНОВ^{1,2}, Е.С. СОЗИНОВ^{1,3},
А.М. ФЕДОТОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

³ЦФПИ ВГУП «ВНИИА», Москва, Россия

УРАВНЕНИЯ ДАЙСОНА-ШВИНГЕРА В СКАЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

Выведена аналогичная уравнению Дайсона-Швингера связь точных пропагаторов и вершин в скалярной электродинамике, и дана ее диаграммная интерпретация.

A.V. BEREZIN¹, A.A. MIRONOV^{1,2}, E.S. SOZINOV^{1,3},
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

³The Center for Fundamental and Applied Research, All-Russia Research Institute of
Automatics, Moscow, Russia

DYSON-SCHWINGER EQUATIONS IN SCALAR ELECTRODYNAMICS

The Dyson-Schwinger equation analog is derived, connecting the exact propagators and vertices in scalar electrodynamics, and their diagrammatic interpretation is given.

Квантовая электродинамика (КЭД) - это теория взаимодействия фермионного электрон-позитронного и электромагнитного полей. Однако иногда возникает необходимость выделить вклад спиновых эффектов или пренебречь ими. Кроме того, существуют и скалярные заряженные частицы. В таких ситуациях используется скалярный аналог КЭД. На первый взгляд, такая теория должна быть проще за счёт отсутствия спиновых степеней свободы. Однако требование калибровочной инвариантности приводит к появлению дополнительного взаимодействия (голой вершины) в такой теории по сравнению со стандартной фермионной КЭД (рис. 1).



Рис. 1. Два типа вершин в скалярной КЭД (вторая вершина в стандартной фермионной КЭД отсутствует).

Одними из важнейших уравнений КЭД являются уравнения Дайсона-Швингера [1,2], устанавливающие связь между точными (одетыми радиационными поправками) пропагаторами и вершинами. В частности, исходя из них удобно строить непertурбативные методы, основанные на частичном суммировании ряда теории возмущений.

В данной работе, исходя из первых принципов, получен аналог уравнений Дайсона-Швингера в скалярной КЭД во внешнем электромагнитном поле и построена их диаграммная интерпретация. Вывод основан на методе континуального интеграла, который особенно удобен для вывода и анализа общих свойств и соотношений. В основе подхода лежит простое математическое тождество: равенство нулю континуального интеграла от полной вариационной производной подынтегрального выражения производящего функционала по источнику. От полученного соотношения берётся ещё одна вариационная производная, после чего все фигурирующие вариационные производные могут быть выражены через точные пропагаторы и вершины [3]. Показано, что из-за наличия двух типов вершин получаемые в результате соотношения имеют намного более сложный вид, чем уравнения Дайсона-Швингера в КЭД, в частности содержат трёх- и четырёхточечную вершины.

Список литературы

1. Dyson F. J. The S matrix in quantum electrodynamics //Physical Review. – 1949. – Т. 75. – №. 11. – С. 1736.
2. Schwinger J. On the Green's functions of quantized fields. I //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1951. – Т. 37. – №. 7. – С. 452-455.
3. Rivers R. J. Path integral methods in quantum field theory. – Cambridge University Press, 1988.

Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ, Д.Б. РОГОЗКИН

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

ОПТИЧЕСКИЙ АНАЛОГ ЭФФЕКТА ААРОНОВА-БОМА

В работе рассмотрен оптический аналог эффекта Ааронова-Бома в магнито-активной среде, содержащей проводник с током. Показано, что сдвиг фаз между охватывающими нить с током световыми волнами будет пропорционален силе тока. Это приводит к тому, что сечение рассеяния света на вихре поля вектора гирации оказывается периодической функцией тока.

E.E.GORODNICHEV, D.B.ROGOZKIN

National Research Nuclear University "MEPhI"

OPTICAL ANALOGUE OF THE AHARONOV-BOHM EFFECT

We study an optical analogue of the Aharonov-Bohm effect in a magneto-active medium containing a wire with current. It is shown that the phase shift between the light beams propagating around the wire will be proportional to the current strength. This leads to the fact that the cross section of light scattering by the vortex of the gyration vector field turns out to be a periodic function of the current strength.

Эффект Ааронова-Бома заключается в том, что две когерентных электронных волны, охватывающих соленоид, интерферируют друг с другом со сдвигом фаз, пропорциональным потоку магнитного поля через ограниченную траекториями электронов поверхность [1]. Аналогичное явление может наблюдаться также при распространении в магнитоактивной среде когерентных световых волн, охватывающих проводник с током.

Функция Грина, описывающая распространение в неоднородном магнитном поле волн, поляризованных по (-) и против (+) часовой стрелки, имеет вид

$$G^{(\pm)}(\vec{r}, \vec{r}') = G_0(\vec{r} - \vec{r}') \exp\left(m \frac{ik_0}{2} \int_{\vec{r}'}^{\vec{r}} d\vec{r}'' \vec{h}(\vec{r}'') \right) \quad (1)$$

где $G_0(\vec{r})$ - свободная функция Грина, $\vec{h}(\vec{r})$ - пропорциональный напряжённости магнитного поля вектор гирации. Подобный вид имеет и функция Грина уравнения Шрёдингера для электрона в слабом магнитном поле [1]. Вместо вектора гирации в случае заряженных частиц в (1) входит векторный потенциал. Аналогом соотношения $rot \vec{A} = \vec{H}$ в магнито-активной среде с током

служит уравнение $rot \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}$. Указанная аналогия наводит на мысль о возможности постановки оптического интерференционного эксперимента, подобного опыту Ааронова-Бома для электронов [1].

Рассмотрим распространение плоской циркулярно поляризованной волны в магнитоактивной среде с линейным током. Волны, огибающие проводник с током «справа» и «слева», приобретают фазы разного знака. Поэтому интерференция этих волн между собой будет приводить к появлению осциллирующего с периодом $\Delta I = \pi V / c$ (I - величина силы тока в проводнике, V - постоянная Верде, c - скорость света) вклада в интенсивность.

Указанный эффект представляет собой оптический аналог эффекта Ааронова-Бома и может наблюдаться в опыте по рассеянию циркулярно поляризованного света. В рассматриваемых условиях сечение рассеяния на вихре поля вектора гирации, создаваемого линейным проводником с током, помещённым внутрь объёма магнитоактивной среды, определяется формулой вида

$$d\sigma(\vartheta) = \frac{d\mathcal{G}}{4\pi^2 \mathcal{G}^2} \sin^2 \frac{\pi VI}{c} \quad (3)$$

Из (3) следует периодическая зависимость сечения рассеяния от величины тока. Полное сечение рассеяния расходится, что связано с медленным убыванием магнитного поля с расстоянием от проводника с током. Аналогичная расходимость в полном сечении возникает и при рассеянии света на флуктуациях диэлектрической проницаемости при медленном убывании корреляционной функции флуктуаций (например, в точке фазового перехода [2]).

Список литературы

- [1]. Y. Aharonov, D. Bohm, Phys.Rev., **115**, 485 (1959).
- [2]. Е.Л. Лакоза, А.В. Чалый, УФН, **140** 393 (1983).

К.С. КРЫЛОВ, В.Д. МУР, Н.Б. НАРОЖНЫЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

РОЖДЕНИЕ ПАР ЧАСТИЦ-АНТИЧАСТИЦ ИЗ ВАКУУМА И МЕТОД МНИМОГО СОБСТВЕННОГО ВРЕМЕНИ

Используя метод мнимого собственного времени, основанный на методе Фока решения релятивистских волновых уравнений, рассмотрен процесс рождения фермионных и скалярных пар из вакуума постоянным однородным электрическим полем. Относительная (условная) вероятность рождения одной пары, которая не зависит от возможного рождения других пар, получена с экспоненциальной точностью, а абсолютная вероятность рождения пары, учитывающая статистику частиц, получена с предэкспоненциальной точностью. На основании этого показана несостоятельность так называемого «эффекта Унру».

K.S. KRYLOV, V.D. MUR, N.B. NAROZHNY

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

PARTICLE-ANTIPARTICLE PAIR PRODUCTION FROM VACUUM AND THE IMAGINARY PROPER TIME METHOD

Using the imaginary proper time method, based on the Fock method of solving the relativistic wave equations, the process of fermionic and scalar pairs production from a vacuum by a constant uniform electric field is considered. The relative (conditional) probability of the one pair production, which does not depend on the possible production of other pairs, was obtained with exponential accuracy, and the absolute probability of pair production, which takes into account the particle statistics, was obtained with pre-exponential accuracy. Based on this, the inconsistency of the so-called "Unruh effect" is shown.

Квазиклассический метод мнимого времени в теории ионизации атомов и ионов внешним электромагнитным полем был предложен в работах [1,2], а его релятивистская версия в статьях [3,4]. На его основе был рассмотрен и процесс рождения пар частиц-античастиц как частный случай «ионизации» вакуума [5]. Естественным обобщением этого метода в релятивистском случае является метод мнимого собственного времени, основанный на фоковском решении [6,7] релятивистских волновых уравнений. Мы на его основе рассматриваем процесс рождения из вакуума постоянным однородным электрическим полем не только фермионных, но и скалярных пар, для которых не применима концепция «моря Дирака».

Относительная (условная) вероятность рождения одной пары, которая не зависит от возможного рождения других пар, получена с экспоненциальной точностью. В то же время абсолютную вероятность рождения пары, учитывающую статистику частиц, можно получить с предэкспоненциальной точностью. Это связано с тем, что в постоянном однородном поле

квазиклассическое приближение справедливо почти всюду. Поэтому выражения для абсолютной вероятности рождения одной фермионной или скалярной пары из вакуума можно сравнить с точными результатами Швингера [8], основанными на методе собственного времени Фока.

Специфику постоянного однородного электрического поля используют при обсуждении так называемого «эффекта Унру» [9], согласно которому собственную систему равноускоренной частицы, в которой она покоится, следует рассматривать как тепловую баню с эффективной температурой Дэвиса-Унру [9,10]. Мы показываем, что в рамках этого предположения распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна несовместимы с выражениями для абсолютной вероятности рождения таким полем из вакуума как фермионных, так и бозонных пар соответственно.

Посвящается памяти Н.Б. Нарожного (1940–2016), ушедшему от нас на заключительных этапах этой работы.

Список литературы

1. Переломов А.М., Попов В.С., Терентьев М.В. // ЖЭТФ. 1966. 50. С. 1393.
2. Попов В.С., Кузнецов В.П., Переломов А.М. // ЖЭТФ. 1967. 53. С. 331.
3. Попов В.С., Мур В.Д., Карнаков Б.М. // Письма в ЖЭТФ. 1997. 66. С. 213.
4. Popov V.S., Mur V.D., Karnakov B.M. // Phys. Lett. 1998. A250. P. 20.
5. Попов В.С. // Письма в ЖЭТФ. 1971. 13. С. 261; ЖЭТФ. 1971. 61. С. 1334.
6. Фок В.А. // Изв. АН СССР. 1937. (4–5). С. 551.
7. Фок В.А. Работы по квантовой теории поля. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1957. С. 141.
8. Schwinger J. // Phys. Rev. 1952. 82. P. 664.
9. Unruh W.G. // Phys. Rev. 1976. D14. P. 870.
10. Davies P.C.W. // J. Phys. 1975. A8. P. 609.

В.В. МАРИНЮК

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ В НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ СИСТЕМЕ СИЛЬНЫХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ

Рассмотрены дальние пространственные корреляции интенсивности в спекле, создаваемом в случайно-неоднородной среде точечным монохроматическим источником волн. Вычислен C_0 -вклад в корреляционную функцию флуктуаций интенсивности для системы сферических однородных частиц произвольного радиуса.

V.V. MARINYUK

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

INFINITE-RANGE INTENSITY CORRELATIONS IN A DISORDERED SYSTEM OF STRONG SCATTERERS

Long-range correlations of the intensity in a speckle pattern produced by a point monochromatic wave source in a random medium are considered. The C_0 -contribution to the correlation function of intensity fluctuations is calculated for a system of spherical homogeneous particles of arbitrary radius.

В работе [1] показано, что радиус корреляций интенсивности в спекле, создаваемом в случайно-неоднородной рассеивающей среде точечным источником оказывается бесконечным. Нормированная корреляционная функция флуктуаций интенсивности $C(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \langle \delta I(\mathbf{r}) \delta I(\mathbf{r}') \rangle / \langle I(\mathbf{r}) \rangle \langle I(\mathbf{r}') \rangle$ вдали от источника (при $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \gg \ell$, ℓ - длина свободного пробега) стремится к отличному от нуля пределу C_0 . Для точечных рассеивателей значение C_0 равно $\pi/k_0 \ell$ [1] ($k_0 = 2\pi/\lambda$, λ - длина волны). В случае слабых (борновских) рассеивателей величина C_0 быстро уменьшается с увеличением размера неоднородностей a [2].

Возникновение C_0 -корреляций обусловлено рассеянием волн вблизи источника (на расстояниях порядка длины волны λ от источника). Для борновских рассеивателей C_0 -вклад в корреляционную функцию определяется только парными корреляциями полей [2] (первые четыре диаграммы на рис. 1). За рамками борновского приближения необходимо учитывать все возможные корреляции между волновыми полями (рис. 1) [3].

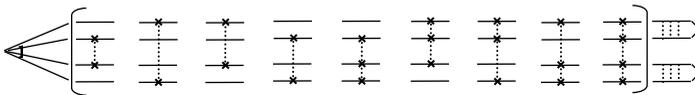


Рис. 1.

C_0 -вклад в корреляционную функцию.

В настоящей работе изображенные на рис.1 диаграммы вычислены аналитически для системы сферических однородных частиц без использования каких-либо приближений для амплитуды однократного рассеяния. Интересный эффект обнаружен при достаточно больших значениях показателя преломления частиц m . В этом случае C_0 -корреляции имеют выраженный резонансный характер. Ослабление корреляций вследствие увеличения размера частиц компенсируется резким возрастанием амплитуды рассеяния вблизи резонанса. В результате величина C_0 в резонансе может значительно превышать значение $\pi/k_0\ell$ для точечных рассеивателей (рис.2).

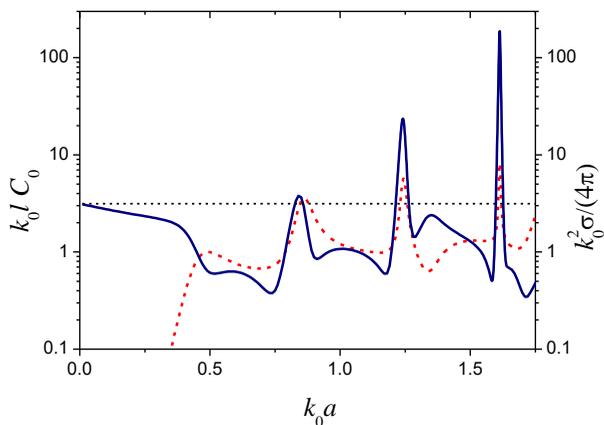


Рис.2. Зависимость C_0 -корреляций (сплошная линия) и сечения однократного рассеяния (пунктирная кривая) от радиуса частиц a . Показатель преломления частиц $m=3.5$.

Список литературы

1. B. Shapiro // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 83. P. 4733-4735.
2. S.E. Skipetrov, R. Maynard // *Phys. Rev. B.* 2000. Vol. 62. P. 886-891.
3. D.B. Rogozkin, M.Yu. Cherkasov // *Phys. Lett. A.* 1996. Vol.214. P.292-300.

Е.С. СОЗИНОВ^{1,2}, Л.В. БОРК^{2,3,4}, Н.Б. МУЖИЧКОВ^{2,5},

Р.М. ЯХИББАЕВ³

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

²*ЦФПИ ВГУП «ВНИИА», Москва, Россия*

³*Лаборатория теоретической физики им. Боголюбова, ОИЯИ, Дубна, Россия*

⁴*НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, Россия*

⁵*Институт теоретической и математической физики, МГУ, Москва, Россия*

АМПЛИТУДЫ РАССЕЯНИЯ В ТОЧНО РЕШАЕМОЙ «ФИШНЕТ» МОДЕЛИ И D=6 ЛЕСТНИЧНЫЕ ДИАГРАММЫ

Рассмотрены амплитуды рассеяния в семействе моделей конформной теории поля («фишнет» теории) в различных размерностях пространства времени D . Была найдена простая связь между 4-х точечными амплитудами рассеяния в $D=4$ и $D=6$ теориях. Исследовано поведение амплитуд рассеяния в этих моделях в режимах сильной и слабой связи. Получена производящая функция l -петлевых лестничных диаграмм в $D=6$.

E.S. SOZINOV^{1,2}, L.V. BORK^{2,3,4}, N.B. MUZHICKOV^{2,5},

R.M. IAKHIBBAEV³

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

²*The Center for Fundamental and Applied Research, All-Russia Research Institute of
Automatics, Moscow, Russia*

³*Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Russia*

⁴*Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia*

⁵*Institute for Theoretical and Mathematical Physics, MSU, Moscow, Russia*

SCATTERING AMPLITUDES IN AN EXACTLY SOLVABLE FISHNET MODEL AND D=6 BOX LADDER DIAGRAMS

Scattering amplitudes in fishnet CFTs are considered in various dimensions D . It is shown that the four-point amplitudes in $D=6$ theory are related via a simple relation with the $D=4$ ones. The behavior of these amplitudes at strong and weak coupling have been investigated. As a by-product a generating function of $D=6$ Box ladder diagrams was obtained.

В последнее время был достигнут большой прогресс в понимании структуры амплитуд в калибровочных теориях [1]. Одним из наиболее известных примеров таких теорий является $N=4$ Максимально Суперсимметричная теория Янга-Миллса ($N=4$ SYM).

Оказывается, что существует интегрируемый предел $N=4$ SYM, который редуцирует $N=4$ SYM теорию до теории двух взаимодействующих скалярных полей, лежащих в присоединенном представлении группы $SU(N_c)$ [2,3].

Фейнмановские диаграммы, которые получаются в данной теории, по своей топологии похожи на «рыболовные сети», поэтому такая теория получила название «фишнет» теории [4]. Интегрируемость этой модели в пределе больших N_c , в частности, позволяет получить точные выражения для четырехточечных корреляционных функций, а потом с помощью редукционной формулы LSZ связать их с соответствующими амплитудами рассеяния. Помимо этого, оказалось, что существует целое семейство таких «фишнет» теорий, которые могут быть определены в произвольной размерности пространства D [5,6].

В работе изучается конкретный случай $D=6$ «фишнет» теории и исследуется замкнутое выражение для амплитуды рассеяния ($2 \rightarrow 2$) [7]. Полученные результаты полностью согласуются с обычной теорией возмущений. Интегрируемость модели позволяет нам исследовать также и случай сильной связи, с которой люди сталкиваются, например, при изучении КХД.

Одним из наиболее важных результатов работы является получение производящей функции для l -петлевых $D=6$ лестничных диаграмм [7]. Также обсуждается Реджевское поведение амплитуды и предсказывается поведение такого типа диаграмм для произвольного числа петель [7].

Список литературы

1. Elvang H, Huang YT. Scattering amplitudes in gauge theory and gravity: Cambridge University Press, 2015.
2. Sieg, C., Wilhelm, M.// Physics Letters B, 756, 118-120 (2016)
3. Grabner, D., Gromov, N., Kazakov, V. and Korchemsky, G.// Physical review letters, 120(11), 111601 (2018)
4. Zamolodchikov, A.B.// Physics Letters B, 97(1), 63-66 (1980)

И.А. ВШИВЦЕВ¹, А.А. МИРОНОВ^{1,2}, Е.С. СОЗИНОВ^{1,3},
А.М. ФЕДОТОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

³ЦФПИ ВГУП «ВНИИА», Москва, Россия

РАСПАД НЕСТАБИЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ В МОДЕЛИ ЛИ

Изучен процесс распада нестабильной частицы в модели Ли с учётом возможного наличия связанных состояний продуктов реакции. С помощью известного общего аналитического решения исследована динамика распада в зависимости от параметров модели.

I.A. VSHIVTSEV¹, A.A. MIRONOV^{1,2}, E.S. SOZINOV^{1,3},
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

³The Center for Fundamental and Applied Research, All-Russia Research Institute of
Automatics, Moscow, Russia

DECAY OF AN UNSTABLE PARTICLE IN THE LEE MODEL

The process of decay of an unstable particle in the Lee model is studied with account for the possible presence of bound final states. Using a known general analytical solution, the decay dynamics is explored for various parameters of the model.

Модель Ли описывает квантовую систему, в которой возможны реакции $A \leftrightarrow B + \theta$ [1]. Она является точно решаемой благодаря игнорированию виртуальных нерезонансных процессов и процессов с участием античастиц. Хотя указанные упрощения и приводят к нарушению лоренц-инвариантности и к нелокальности взаимодействия [2], все же в остальном модель Ли во многих аспектах аналогична квантовой теории поля и поэтому представляет большой интерес. В частности, она позволяет проследить происхождение бесконечной перенормировки массы и константы связи [1,2], исследовать резонансное рассеяние и границы применимости экспоненциального закона распада [3], содержательно обсуждать наблюдаемые проявления нарушения четности [4] и т.п.

В работе рассмотрен простейший процесс распада частицы A в одномерной модели Ли с тяжелыми частицами A и B . С учетом взаимодействия волновая функция имеет вид

$$|\psi(t)\rangle = \alpha(t)a^+(p)|0\rangle + \int dk\varphi(k,t)\vartheta^+(k)b^+(p-k)|0\rangle, \quad (1)$$

где $a^+(p)$, $b^+(p)$, $\vartheta^+(k)$ – операторы рождения частиц A , B и θ соответственно в состояниях с данными импульсами. Коэффициенты $\alpha(t)$ и $\varphi(k,t)$ имеют смысл амплитуды нераспада и волновой функции частицы θ в импульсном представлении в момент времени t , соответственно.

Подставляя (1) в уравнение Шредингера, с учетом принятых начальных условий находим

$$\alpha(t) = \frac{1}{2\pi i} \int \frac{e^{-iEt} dE}{E - m_A - \pi(E)}, \quad (2)$$

$$\varphi(k,t) = \frac{1}{2\pi i} \int \frac{f^*(k)}{E - m_B - \omega(k)} \frac{e^{-iEt} dE}{E - m_A - \pi(E)}, \quad (3)$$

где $m_{A,B}$ - массы частиц A и B ,

$$\pi(E) = \int \frac{|f(k)|^2 dk}{E - m_B - \omega(k)} \quad (4)$$

- собственная энергия частицы A , $\omega(k)$ – дисперсионное соотношение частицы θ , $f(k)$ - зависящая от ее импульса константа связи. Интегрирования ведутся вдоль вещественной оси с обходом особенностей подынтегральных выражений сверху.

Путем численного расчета интегралов в формулах (2) - (4) детально исследована динамика распада в зависимости от параметров модели. В частности, изучены границы применимости экспоненциального закона распада при разлете продуктов распада и исследован случай наличия их связанных состояний.

Список литературы

1. Lee T.D. // Phys. Rev. 1954. Vol. 95, №5, P. 1329-1334.
2. Schweber S.S. An Introduction to Relativistic Quantum Field Theory // Harper & Row, 1961, P. 352-370.
3. Giacosa F. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1612, P. 012012.
4. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике // 2-ое изд., изд-во Наука, 1971, с. 463-505.

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

В.А. ШАРГАТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

**ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ «ЛИГУС» ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ И ГЛОБАЛЬНОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЙ**

Разработан пакет прикладных программ ЛИГУС, позволяющий выполнять исследования линейной и глобальной устойчивости решений в виде бегущей волны для широкого спектра задач механики сплошных сред на высокопроизводительных вычислительных системах. Комплекс позволяет также исследовать динамику и устойчивость фильтрационных течений с фазовыми превращениями в пористой среде.

V.A. SHARGATOV

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

**THE PACKAGE OF APPLICATION PROGRAMS "LIGUS" FOR
STUDYING SPECTRAL AND GLOBAL SOLUTIONS STABILITY**

The package of application programs LIGUS has been developed, which makes it possible to carry out studies of the spectral and global stability of traveling wave solutions for a wide range of problems in continuum mechanics on high-performance computing systems. The complex also makes it possible to study the dynamics and stability of water evaporation fronts in a porous medium.

Создан комплекс программ ЛИГУС для исследования линейной и глобальной устойчивости решений широкого спектра задач механики сплошных сред на высокопроизводительных вычислительных системах. Комплекс позволяет исследовать линейную и гофрировочную неустойчивость бегущих волн, а также их глобальную устойчивость для следующих задач:

- одномерных ограниченных неоднородных решений в виде бегущей волны для обобщенного в смысле нелинейности уравнения Кортевега-де Вриза-Бюргерса;
- уравнений движения сжимаемого газа;
- уравнений распространения волн по эластичным и гиперэластичным трубкам, заполненным жидкостью;

- уравнений, описывающих распространение слабонелинейных квазипоперечных бегущих волн в упругой слабоанизотропной среде.

Для исследования линейной устойчивости используется функция Эванса (см. [1], [2]) с применением метода внешних форм. Исследование устойчивости по отношению к конечным возмущениям выполняется в пакете прикладных программ прямым численным решением.

Пакет прикладных программ позволяет также исследовать устойчивость фронта фазового перехода, распространяющегося в пористой среде. Для численного моделирования задач с подвижными границами фазовых переходов использовался метод граничного элемента, разработанный в [3], с потенциалами простого и двойного слоя, с неравномерным разбиением границы, адаптирующемся к движению поверхностей, на которых происходит фазовый переход, а также контактных поверхностей

Программная реализация выполнена на языке C++ с использованием SIMD и MPI.

Список литературы

1. П'ичев А.Т., Chugainova A.P., Shargatov V.A.// Doklady Mathematics. 2015. Vol. 91, P. 347–351.
2. Chugainova A. P., П'ичев А. Т., Shargatov V. A // Mathematics and Mechanics of Solids. 2019. Vol. 24, P. 3456–3471
3. Shargatov V. A.// Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2018. Vol. 58, № 7, P. 1172–1187.

Ж.А. АМИР, Ж.Б. КУДЬЯРОВА, Д.А. БАЙСЕЙТОВ, М.И. ТУЛЕПОВ

Казахский Национальный Университет им.ал-Фараби, г.Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОГЕНЕРИРУЮЩЕГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ

Исследованы термодинамические характеристики процессов горения газогенерирующей композиции на основе перхлората аммония. Был найден оптимальный состав смеси, в качестве горючего использовали отработанный полиэтилен.

Разработанный газогенераторный состав на основе перхлората аммония может быть использован для работы в открытых карьерах при добычи блочного камня в щадящем режиме или разрушении твердых минеральных пород. Эта композиция безопасна с экологической точки зрения, в продуктах практически отсутствуют токсичные газы, таких как монооксид углерода и окислы азота.

ZH.A. AMIR, ZB.B. KUDYAROVA, D.A. BAISEITOV,
M.I. TULEPOV

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

RESEARCH OF THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF GAS-GENERATING COMPOSITION BASED ON AMMONIUM PERCHLORATE

The thermodynamic characteristics of combustion processes of a gas-generating composition based on ammonium perchlorate have been investigated. The optimal composition of the mixture was found, in which waste polyethylene was taken as fuel.

The developed gas generator composition based on ammonium perchlorate can be used for open pit mining for splitting block stone in a gentle mode or breaking hard mineral rocks. This composition is safe from an environmental point of view, there are no toxic gases such as carbon monoxide and nitrogen oxides in the products.

При разработке газогенерирующих составов и изделий на их основе широко применяются нитраты и перхлораты. Они имеют невысокую стоимость, благоприятные эксплуатационные и технологические характеристики. В основном интерес к разработке составов на основе нитратов и перхлоратов обусловлен возможностью утилизации бытовых отходов, а именно, использовании в качестве горючего полиэтилена (ПЭ) или полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Поэтому поиск новых, доступных компонентов газогенерирующих составов, имеющих широкую сырьевую базу, является

актуальным исследованием [1].

В последнее время широко используются газогенераторные составы на основе перхлоратов с углеводородами (СхНу) [2].

Термодинамические расчеты проводились с помощью программного комплекса TDS [3]. Для проведения термодинамического моделирования горения была решена *HP*-задача при заданных значениях давления и эн- тальпии методом экстремума характеристических функций. В качестве исследуемого состава была выбрана смесь перхлорат аммония (ПХА) и ПЭ в различных соотношениях горючего и окислителя. В исследуемой смеси ПХА+ПЭ содержание горючего варьировалось от 5% до 15%. Расчет проводился при атмосферном давлении. Определение температуры и объема продуктов горения газогенерирующих составов имеет большое значение, так как является критерием для оценки существующих и облег- част создание новых, более совершенных составов.

При стехиометрическом соотношении (90% ПХА и 10% ПЭ) достигается максимальная температура горения около 2700 °С и значительный выход продуктов горения, основными компонентами которых являются Н₂О, N₂, О₂, СО₂.

Для изучения влияния окислителя перхлората аммония на энерговыде- ление композитных энергетических материалов, термическое разложение ПХА и ПХА+ПЭ было изучено методами термогравиметрии и дифферен- циальной сканирующей калориметрии. В данной работе для проведения синхронного термического анализа образцов ПХА и смеси ПХА+ПЭ ис- пользовался дериватограф Netzsch STA 409 РС, эксперимент проводился в инертной среде со скоростью нагрева 10 К/мин.

Проведенные термодинамические расчеты параметров горения газогенераторных составов показали, что наибольшая работоспособность и удельная газопроизводительность наблюдаются в области стехиометриче- ского соотношения исходных компонентов.

Список литературы

1. Tulepov M.I., Gabdrashova S.E., Rakhova N.M. and others // Development of gas-generator chemical cartridges working in the mode of non-explosive destructive mixture // *Rasayan Journal of Chemistry*. 2018. № 1. P. 287-293.
2. Амир Ж.А., Турсынбек С. // Изучение горения газогенераторных составов с добавками углеродных порошков // Сб. V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследование и технологии» ЛаПлаз-2019. 2019. С. 251-252.
3. Викторов С.Б., Губин С.А., Маклашова И.В., Пепекин В.И. Прогнозирование детонационных характеристик безводородных взрывчатых веществ. // *Химическая физика*. 2005. 24 (12). С. 22-45.

Э.К. АНДЕРЖАНОВ, С.П. МЕДВЕДЕВ, А.М. ТЕРЕЗА, С.В. ХОМИК
*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
Москва, Россия*

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛЕ С МНОГОСТУПЕНЧАТЫМ ФОКУСИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Проведено экспериментальное исследование условий перехода горения в детонацию в канале, оборудованном многоступенчатым фокусирующим элементом в виде П-образного колена. В качестве модельного газа использовалась смесь пропан-воздух. Показано, что в предложенной схеме устойчивый переход горения в детонацию наблюдается в диапазоне концентрации пропана 3.5-5% в воздухе.

E.K. ANDERZHANOV, S.P. MEDVEDEV, A.M. TEREZA,
S.V. KHOMIK
*N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russia*

INITIATION OF DETONATION IN A CHANNEL WITH A MULTI-STEP FOCUSING ELEMENT

An experimental study of the conditions for the deflagration-to-detonation transition in a channel equipped with a multi-step focusing element in the form of a U-shaped bend has been carried out. A propane-air mixture was used as a model gas. It is shown that, in the proposed scheme, a stable transition to detonation is observed in the range of propane concentration of 3.5-5% in air.

В устройствах, предназначенных для промышленного применения детонационных процессов в газах, используются различные способы осуществления перехода горения в детонацию. Экономически целесообразным является максимальное сокращение преддетонационного расстояния. В большинстве случаев это достигается сочетанием различных способов воздействия для эффективного ускорения пламени. Схема установки детонационного сжигания может включать следующие основные элементы: форкамеру, в которой осуществляется зажигание смеси с последующим истечением продуктов сгорания; секцию ускорения пламени, например, оборудованную рядом кольцевых вставок; секцию инициирования детонации (СИД); секцию контроля распространения детонации, как правило, представляющую собой прямолинейный канал с гладкими стенками. Ключевую

роль играет СИД, задачей которой является геометрическое воздействие на ударную волну, распространяющуюся впереди фронта пламени.

В [1] предложена конструкция СИД в форме П-образного колена (П-СИД). С помощью пакета GDT [2] выполнено численное моделирование инициирования детонации при прохождении ударной волны по каналу, оборудованному П-СИД. Показано, что инициирование детонации происходит при отражении (фокусировке) ударной волны на угловых элементах, т.е., П-СИД оказывает многоступенчатое фокусирующее воздействие.

Для практической реализации идеи П-СИД, на основе детонационной трубы диаметром 54 мм, создан стенд и проведены эксперименты со смесями пропан – воздух. Установлено, что применение элемента многоступенчатой фокусировки (П-СИД) ударно-волновых возмущений обеспечивает инициирование детонации или в самом этом элементе или же сразу на выходе из него. Устойчивое инициирование детонации получено для смесей с концентрацией пропана в диапазоне от 3.5% до 5%. При изменении концентрации пропана до значений, лежащих вне этого диапазона наблюдается быстрое горение, характеризующееся скоростью распространения, близкой к скорости звука в продуктах сгорания. Обнаружено, что во всем исследованном диапазоне концентрации пропана инициирование детонации происходит через стадию формирования пересжатой волны, скорость которой превышает скорость детонации Чепмена-Жуге. Таким образом, экспериментальным путем доказана эффективность многоступенчатого фокусирующего элемента, который может быть рекомендован к использованию в установках, предназначенных для детонационного сжигания горючих газовых смесей.

Список литературы

1. Medvedev S P, Khomik S V, Tereza A M et al. 2020 J. Adv. Research in Dynamical & Control Systems. 12 (7) 1021
2. Зибаров А.В. Пакет прикладных программ GAS DYNAMICS TOOL и его применение в задачах численного моделирования газодинамических процессов. Дис. ...д-ра физ.-мат. наук: 05.13.16 - Тула, 2000, 307 с.

П.А. ВЛАСОВ¹, В.Н. СМИРНОВ¹, Н.С. МАЛЫШЕВ¹, Д.И.
МИХАЙЛОВ¹, Г.Л. АГАФОНОВ¹, В.А. ПОЛЯНСКИЙ²,
И.Л. ПАНКРАТЬЕВА²

¹*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова
Российской Академии наук, Москва, Россия*

²*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,
Россия*

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ОКИС- ЛЕНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ ЭЛЕК- ТРИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ С ПРОВОДЯЩЕЙ И ДИЭЛЕК- ТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Проведены эксперименты на ударной трубе в отраженных ударных волнах по регистрации электрических токов на цилиндрические зонды с проводящей и диэлектрической поверхностью, которые находились под отрицательным (-9 В) или положительным ($+9$ В) потенциалом относительно стенок ударной трубы. В экспериментах регистрировались соответственно токи смещения и суммарные полные токи на цилиндрические зонды с диэлектрической и проводящей поверхностью. Одновременно регистрировались сигналы хемилюминесцентного излучения электронно-возбужденных радикалов OH^* ($\lambda = 308$ нм) и CH^* ($\lambda = 430$ нм). Эксперименты проводились с различными бедными смесями метана и ацетилена с кислородом в аргоне. Проведены предварительные расчеты для теоретической модели электрического зонда с диэлектрической и проводящей поверхностью. Расчеты показали, что ток смещения для зонда под отрицательным потенциалом с диэлектрической поверхностью определяется величиной скорости химической ионизации, площадью поверхности зонда и величиной электрического потенциала. Показана тесная корреляция времен достижения максимума зондового тока и максимума хемилюминесцентного излучения электронно-возбужденных радикалов OH^* и CH^* .

P.A. VLASOV¹, V.N. SMIRNOV¹, N.S. MALYSHEV¹,
D.I. MIKHAILOV¹, G.L. AGAFONOV¹, V.A. POLYANSKIY²,
I.L. PANKRATYEVA²

¹*Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia*

²*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

DIAGNOSTICS OF PLASMA FORMED DURING THE OXIDATION OF HYDROCARBONS IN SHOCK WAVES BY ELECTRIC PROBES WITH A CONDUCTIVE AND DIELECTRIC SURFACE

Experiments were carried out behind shock waves with recording the electric current flowing through cylindrical probes with a conductive and dielectric surface under a negative (-9 V) or positive (+9 V) potential relative to the walls of the shock tube, with the displacement and total currents measured, respectively. Simultaneously, the signals of chemiluminescent emission from electronically excited OH* ($\lambda = 308$ nm) and CH* (λ

= 430 nm) radicals were recorded. Experiments were carried out with various lean mixtures of methane and acetylene with oxygen diluted in argon. Preliminary calculations were performed using a theoretical model of an electric probe with a dielectric and conducting surface. Simulations showed that the displacement current on a probe under a negative potential with a dielectric surface is controlled by the chemical ionization rate, the surface area of the probe, and the electric potential. A close correlation was observed between the times of reaching the maximum of the probe current and the maximum of the chemiluminescent emission signals from the electronically excited OH* and CH* radicals.

При горении углеводородов в пламенах и их окислении за фронтом ударной волны образуется плазма за счет процессов химической ионизации. Для ее диагностики широко используются электрические зонды различной конструкции с проводящей поверхностью. Как показывают наши предварительные эксперименты, электрические зонды с непроводящей диэлектрической поверхностью гораздо менее чувствительны к различным неконтролируемым процессам, обычно протекающим на каталитической поверхности проводящего зонда. Проблему представляет теоретическая интерпретация экспериментально измеренных зондовых токов. Влияют на зондовые измерения не только элементарные процессы, происходящие в прилегающей к зонду области плазмы, но и процессы на поверхности зонда (эмиссия, отражение, образование поверхностных пленок). Все эти факторы существенно усложняют количественную интерпретацию зондовых измерений. В подавляющем большинстве случаев экспериментаторы имеют дело с токами проводимости положительных и отрицательных ионов и свободных электронов. Для стационарной низко-температурной плазмы с относительно медленным источником термической ионизации это вполне оправдано.

Однако в случае, когда заряженные частицы образуются в быстрых реакциях химической ионизации, весьма заметный вклад в полный ток на зонд, который обычно и регистрируется в экспериментах, вносит ток смещения. Ток смещения не связан непосредственно с переносом зарядов в пространстве при их направленном движении в электрическом поле, а обусловлен изменением со

временем напряженности электрического поля вблизи поверхности зонда в результате образования двойного электрического слоя при появлении в реагирующей системе заряженных частиц. Можно ожидать, что токи смещения, регистрируемые электрическими зондами с изолированной поверхностью, будут гораздо менее чувствительны к процессам ионизации с участием различных примесей на поверхности электрического зонда и будут чувствительны только к химическим процессам ионизации в реакционной смеси в газовой фазе, приводящим к образованию и изменению во времени двойного электрического слоя вблизи поверхности зонда. Целью работы было проведение экспериментальных и расчетных исследований поведения цилиндрических зондов как с проводящей, так и непроводящей диэлектрической поверхностью помещенных в плазму, в которой идут процессы химической ионизации с образованием свободных электронов и ионов разных сортов при окислении различных смесей углеводородов с кислородом в аргоне за отраженными ударными волнами и сопоставление зондовых сигналов с сигналами хемилюминесцентного излучения электронно-возбужденных радикалов OH^* ($\lambda = 308 \text{ нм}$) и CN^* ($\lambda = 430 \text{ нм}$).

Вас.С. ИВАНОВ, В.С. ИВАНОВ, С.М. ФРОЛОВ

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
Москва, Россия*

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЕССЕ- ТОЧНЫМ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧА- СТИЦ В ЗАДАЧАХ С ЗАДАННЫМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ

Разработана вычислительная программа для трехмерного расчета распростра- нения тепла в трехмерных телах, в том числе с заданным тепловым потоком через стенку. Выполнена проверка реализованного алгоритма на задачах с аналитиче- скими или полученными с помощью сеточных методов решениями. Получено удовлетворительное количественное и качественное согласие результатов расче- тов. Разработанный алгоритм будет использован для решения сопряженных газо- динамических и тепловых задач.

Vas.S. IVANOV, V.S. IVANOV, S.M. FROLOV

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, RAS, Moscow, Russia

SOLUTION OF THERMAL CONDUCTIVITY EQUATION BY A MESHLESS METHOD OF SMOOTHED PARTICLE HYDRO- DYNAMICS IN PROBLEMS WITH A GIVEN HEAT FLUX

A computational program for a three-dimensional calculation of heat propagation in three- dimensional bodies, including a given heat flux through the wall has been devel- oped. An implemented algorithm is checked on problems with analytical or obtained by grid solutions. Satisfactory quantitative and qualitative agreement between the results has been obtained. The designed algorithm will be used to solve conjugate gas-dynamic and thermal tasks.

Расчет распространения тепла в твердом теле связано с решением начально- краевой задачи, которая в большинстве случаев не имеет анали- тического решения. Для получения численных решений в задачах с обла- стями сложной геометрии предпочтение часто отдают бессеточным мето- дам, одним из которых является метод сглаженных частиц (МСЧ) [1]. Нами разработан параллельный вариант МСЧ, использующий GPU для решения задач распространения тепла в твердом теле. Математическая модель основана на уравнении теплопроводности изотропного материала в присутствии объемных источников тепла. Разностный аналог дифференциального уравнения распространения тепла имеет следующий вид [2]:

$$c_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_j \rho \frac{m_j}{k_j} \frac{4k_i}{(k_i + k_j)} \nabla W_{ij}(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \frac{1}{r_{ij}^2 + \eta^2} + F_i$$

где c – удельная теплоемкость, T – температура, m – масса частицы, ρ – плотность, k – коэффициент теплопроводности, ∇W – производная сглаживающей функции, \mathbf{r} – радиус-вектор в трехмерном пространстве, F – плотность объемных источников тепла.

Для проверки алгоритма нами проведены расчеты распространения тепла в твердом теле кубической формы размерами 1х1х1 м. В данном теле на одну из граней куба подавался постоянный тепловой поток, а остальные стенки задавались теплоизолированными.

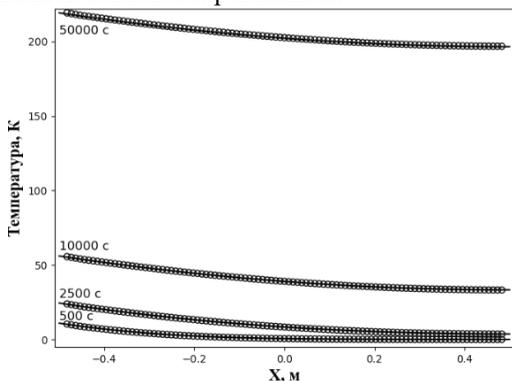


Рис. 1 Сравнение численных расчетов распределения температуры внутри куба бессеточным методом (маркеры) с результатами расчетов, полученных методом конечных объемов (сплошная линия), для четырех моментов времени.

На Рис. 1 представлено сравнение распределения температуры внутри куба для четырех моментов времени. Из Рис. 1 видно удовлетворительное количественное и качественное согласие результатов расчетов с использованием бессеточного численного метода.

Список литературы

1. Gingold R.A., Monaghan J.J. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Nonspherical Stars // Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1977. T. 181.C. 375
2. Sikarudi M. A. E., Nikseresht A. H. Neumann and Robin boundary conditions for heat conduction modeling using smoothed particle hydrodynamics // Computer Physics Communications, 2016. T. 198.C. 1-11.

И.О. ШАМШИН, М.В. КАЗАЧЕНКО, С.М. ФРОЛОВ

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва*

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СМЕСЯХ МЕТАН – ВОДОРОД – ВОЗДУХ

Исследован переход горения в детонацию (ПГД) в стехиометрических смесях метан – водород – воздух с объемной долей водорода в горючем от 0 до 1. Выявлен нелинейный характер изменения расстояния и времени ПГД при увеличении доли водорода в горючем.

I.O. SHAMSHIN, M.V. KAZACHENKO, S.M. FROLOV

*N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russian Federation*

DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN METHANE – HYDROGEN – AIR MIXTURES

The deflagration-to-detonation transition (DDT) in stoichiometric methane - hydrogen - air mixtures with the volume fraction of hydrogen in the fuel ranging from 0 to 1 has been studied. The nonlinear variation of the DDT run-up distance and time with hydrogen volume fraction in the fuel is revealed.

В связи с необходимостью улучшения характеристик и экологических показателей поршневых и газотурбинных энергетических установок возрастает интерес к метановодородному горючему – смеси природного газа и водорода. Используя метод и установку на базе эталонной детонационной трубы (ЭДТ), содержащей секцию ускорения пламени и винтовую секцию для фокусировки ударной волны (УВ) [1, 2], исследован переход горения в детонацию (ПГД) в стехиометрических смесях метан- водород-воздух с объемной долей водорода в горючем $\beta = [H_2]/([CH_4]+[H_2])$ от 0 до 1 при нормальных условиях ($P_0=0,1$ МПа, $T_0=293$ К).

Обнаружен нелинейный характер зависимости расстояния и времени ПГД от β (Рис. 1). ПГД зарегистрирован во всем интервале $0 \leq \beta \leq 1$ и происходит через стадию пересжатой детонации. Степень пересжатия детонации $|D_{max}-D_{CJ}|/D_{CJ}$ достигает максимального значения $\sim 15\%$ в интервале $0,3 \leq \beta \leq 0,5$ (D_{max} – максимальная скорость детонации). В интервале $0,3 \leq \beta \leq 0,6$ расстояние ПГД увеличивается, а зависимость времени ПГД отклоняется от линейной. Вне этого интервала ($\beta < 0,3$ и $\beta > 0,6$) ПГД про-

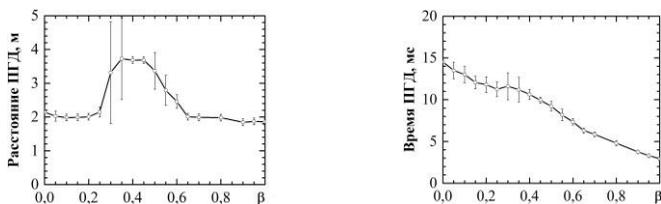


Рис. 1. Расстояние и время ПГД

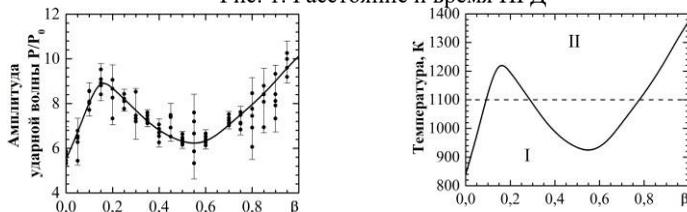


Рис. 2. Изменение амплитуды ударной волны, генерируемой пламенем, и соответствующее ей рассчитанное значение температуры за отраженной ударной волной исходит в винтовой секции ЭДТ. Величина скорости самоподдерживающейся детонации D_s воспроизводится от опыта к опыту во всем интервале $0 \leq \beta \leq 1$. Дефицит скорости детонации $|D_s - D_{Cl}|/D_{Cl}$ увеличивается с уменьшением β и достигает максимального значения в 5%. Динамика ускорения пламени до входа в винтовую секцию ЭДТ воспроизводится от опыта к опыту, а скорость пламени с ростом β увеличивается. В отличие от пламени интенсивность УВ, генерируемой пламенем, изменяется с ростом β немонотонно (рис. 2). Следовательно, немонотонно изменяются температура и давление газа за отраженной УВ. Последнее приводит к сложной зависимости задержки самовоспламенения ударно сжатой горючей смеси от β .

В области I при $0,3 \leq \beta \leq 0,8$ и $T < 1100$ К проявляются особенности низкотемпературных химических превращений H_2 и CH_4 . В области II при $T > 1100$ К предшествующее возникновению ПГД самовоспламенение H_2 и CH_4 происходит по высокотемпературному механизму.

Список литературы

1. Frolov S.M., Zvegintsev V.I., Aksenov V.S. and others // Shock Waves, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00193-020-00966-9>
2. Frolov S.M., Shamshin I.O., Kazachenko M.V. and others // Energies 2021, 14, 820. <https://doi.org/10.3390/en14040820>

Р.И. КАНЫГИН, И.И. КАНЫГИН, Е.Е. МЕШКОВ, И.А. НОВИКОВА,
Л.Л. ОГОРОДНИКОВ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КУПОЛА ВСПЛЫВАЮЩЕГО ПУЗЫРЯ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ АТВУДА

Представлены результаты экспериментов по исследованию устойчивости купола большого пузыря из воды, всплывающего в растворе соли. Эксперименты демонстрируют подавление неустойчивости Рэля-Телора на куполе всплывающего пузыря при числе Атвуда $A \ll 1$. При этом наблюдается интенсивное развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на боковой поверхности пузыря. Устойчивость купола всплывающего пузыря объясняется действием ускоренного сдвигового течения воды на поверхности всплывающего пузыря. Приводятся результаты расчетного моделирования задачи по программе STAR-CCM +.

R.I. KANYGIN, I.I. KANYGIN, E.E. MESHKOV, I.A. NOVIKO-VA, L.L.
OGORODNIKOV

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

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF THE POP-UP BUB- BLE DOME AT SMALL ATWOOD NUMBER

Results of experiments researching the stability of the dome of a large water bubble rising in a salt solution are presented. The experiments demonstrate the suppression of the Rayleigh-Taylor instability on the dome of the rising bubble with the Atwood number being $A \ll 1$. In the process, an intensive development of the Kelvin-Helmholtz instability on the lateral surface of the bubble is being observed. The stability of the dome of the rising bubble is explained by the action of an accelerated shear flow of water over the bubble surface. The results of computational modeling of the problem by the STAR-CCM + program are presented

Вопрос об аномальной устойчивости поверхности купола большого воздушного пузыря, всплывающего в воде (число Атвуда $A \approx 1$), привлекал внимание исследователей с 50-х годов XX века (см. напр. [1]). Это связывается с действием поверхностного натяжения и кривизны купола пузыря. Существует другая точка зрения, в соответствии с которой, устойчивость купола пузыря

объясняется действием ускоренного сдвигового течения воды по поверхности всплывающего пузыря [2].

Приводятся результаты исследования этой задачи в экспериментах, в которых создавался «пузырь» из чистой воды, всплывающий в растворе соли (числе Атвуда $A=0.007$ и менее). Полученные результаты демонстрируют стабилизацию РТ-неустойчивости на куполе всплывающего «пузыря» и в этом случае, хотя поверхностное натяжение здесь практически отсутствует. Одновременно наблюдается интенсивное развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца под действием сдвигового (но не ускоренного) течения на боковой поверхности всплывающего пузыря

Выполнено численное моделирование этой задачи по программе STAR-CCM+. В этом случае в окрестности полюса - точки пересечения оси симметрии с куполом пузыря (в которой сдвиговое течение отсутствует) развивается РТ-неустойчивость.

В эксперименте (в отличие от расчета) ось симметрии пузыря может менять свое положение.

Список литературы

1. Batchelor G.K.. The stability of a large gas bubble rising through liquid //J.Fluid Mech. (1987), 184, pp.399-422
2. Meshkov E.E.. On the structure of the Rayleigh-Taylor mixing zone. // Proc. Abstr. of 6th Intl. Conf. "Turbulent Mixing and Beyond", August 14-18, 2017. Trieste, Italy, p 29.

А.В. КАРАБУЛИН^{1,2}, В.И. МАТЮШЕНКО³, М.Е. СТЕПАНОВ¹, В.И. НИКОЛАЙЧИК⁴, И.И. ХОДОС⁴

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка*

²*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

³*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук в г. Черноголовке*

⁴*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка*

ОКИСЛЕНИЕ ИНДИЕВЫХ НАНОПРОВОЛОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В КАМЕРЕ ПЭМ

Исследовано *in situ* окисление In нанопроволок толщиной менее 10 нм, полученных в сверхтекучем гелии (He II) при лазерном испарении мишени. Нанопроволоки, сформированные в вихрях He II, имели мелкокристаллическую ГЦК структуру в противоположность ГПУ структуре массивного индия. Показано стимулированное электронным пучком микроскопа превращение In нанопроволок в монокристаллическое состояние, соответствующее оксиду In_2O_3 . Установлено, что трансформация происходит путем движения фронта перекристаллизации вдоль нанопроволок.

KARABULIN^{1,2}, V.I. MATYUSHENKO³, M.E. STEPANOV¹,

¹*Institute of Problems of Chemical Physics, RAS, Chernogolovka*

³*Joint Institute for High Temperatures (RAS), Moscow*

⁴*Chernogolovka Branch of the N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics (RAS), Chernogolovka*
Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS, Chernogolovka

OXIDATION OF INDIUM NANOWIRES BY ELECTRON BEAM IN TEM CHAMBER

The *in situ* oxidation of In nanowires less than 10 nm thick, obtained in superfluid helium by laser evaporation of a target, has been studied. The nanowires formed in He II vortices had a fine-crystalline fcc structure, in contrast to the hcp structure of bulk indium. The electron-beam-stimulated transformation of In nanowires into a single-crystal state corresponding to In_2O_3 oxide is shown. It was found that the transformation occurs through the movement of the recrystallization front along the nanowires.

Индий и нанообъекты из индия и его соединений широко используются в научных исследованиях, например, в исследованиях квазиодномерной сверхпроводимости. Ведутся исследования вариантов его применения в электронике в виде наночастиц и нанопроволок. Данная работа посвящена

изучению воздействия электронного пучка на поликристаллические In нанопроволоки толщиной менее 10 нм.

Проволоки получали в квантованных вихрях в сверхтекучем гелии по методу, изложенному в работе [1]. Для ввода паров металла в объём сверхтекучего гелия использовалось испарение лазерным лучом помещенной в He II мишени. Проволочки оседали в кристате на золотую сеточку, покрытую перфорированной углеродной пленкой, и изучались затем в ПЭМ JEM-2100.

Рис. 1а показывает, что размер кристаллитов существенно меньше поперечного размера нанопроволок. Также было обнаружено, что нанопроволоки состоят из хаотично ориентированных малых кристаллитов, причем нанопроволоки имеют ГЦК решетку, хотя объёмный индий обладает тетрагональной решёткой. Через несколько минут воздействия высокоэнергетического электронного пучка начинается переход нанопроволок в монокристаллическое состояние (рис. 1b-d). Движение фронта перекристаллизации вдоль нанопроволоки по всему поперечному сечению нанопроволоки из некоторого центра зарождения. В итоге происходит полная перекристаллизация нанопроволоки в монокристаллическое состояние.

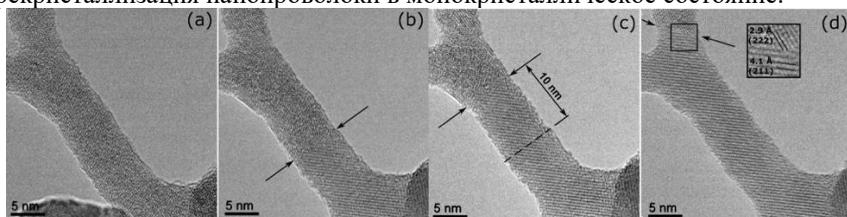


Рис. 1. Движение фронта окисления вдоль индиевой нанопроволоки.

Дальнейшие исследования показали, что перекристаллизованные нанопроволоки обладают кубической кристаллической решёткой, соответствующей оксиду индия In_2O_3 .

Список литературы

1. Gordon E.B., A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. The role of vortices in the process of impurity nanoparticles coalescence in liquid helium. *Chem. Phys. Lett.*, 2012, 19, 64-68.

**Б.Т. ЛЕСБАЕВ, Г.С. УСТАЕВА, Н.Б. РАХЫМЖАН, А.
БИДИЛЬДАЕВА**

Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

СИНТЕЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ В КОАКСИАЛЬНОМ ПЛАМЕНИ

Проведено экспериментальное изучение возможностей использования преимуществ коаксиального горения разных топлив для управления процессами образования продуктов горения.

**B.T. LESBAYEV, G.S. USTAYEVA, N.B. RAKHYMZHAN,
A. BIDILDAYEVA**

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

SYNTHESIS OF NANOMATERIALS IN A COAXIAL FLAME

An experimental study of the possibilities of using the advantages of coaxial combustion of different fuels to control the formation of combustion products has been carried out.

В пламени развитие цепной реакции происходит благодаря образующимся в процессе горения активным промежуточным частицам, свободным радикалам, атомам, ионам, возбужденным молекулам. Варьируя такими параметрами как соотношение топлива к окислителю, давление, температура, подвод или отвод внешней энергии можно изменять условия горения, что в свою очередь приводит к изменению состава активных промежуточных частиц и их количественного соотношения. Это обстоятельство дает возможность управлять процессами образования конечных продуктов горения, что приобретает особую актуальность с развитием нанотехнологий, т.к. многочисленные исследования по синтезу широкого спектра наноматериалов показывают, что метод их синтеза в пламенах является одним из перспективных для масштабного производства.

Экспериментальная установка состоит из двух коаксиальных горелок для получения ламинарных предварительно перемешанных пламен, зоны реакций которых могут быть приведены в контакт для получения совмещенной реакционной зоны коаксиального пламени. Горелки инсталлированы таким образом, что позволяют смешивать пламена на различных стадиях развития реакции. Это условие позволяет регулировать процесс формирования стабилизирующихся продуктов горения, путем подбора топлив и изменения в совмещенной реакционной зоне коаксиального пламени концентрационной плотности и состава промежуточных частиц.

Полученные результаты показывают перспективность использования процесса коаксиального горения различных топлив для уменьшения выбросов

сажевых частиц и контролируемого синтеза наноматериалов в пламени. Сравнительный анализ ИК-спектров экстрактов сажи, полученных в коаксиальном пламени бензола и ацетилена при давлении в системе 90-95 торр и 60-65 торр показывает, что в ИК-спектрах с понижением давления на 30 торр, интенсивность пиков, соответствующих фуллерену C_{60} возрастает примерно в четыре раза. Проведенные исследования показали, что использование коаксиальных пламен для синтеза графенов, является одним из перспективных методов. Установлено, что при организации коаксиального горения, изменяя типы топлив, можно добиться условий для получения графенов с заданным числом слоев. В коаксиальном пламени пропана с этанолом синтезированы графены, содержащие от 10 слоев и больше, ацетилена с этанолом синтезированы графены, содержащие от 5 до 10 слоев, в коаксиальном пламени бензола с этанолом одно и двухслойный графены. Для снижения процесса сажеобразования при горении углеводов применяют метод добавки в топлива различных спиртов. В работе [1] была разработана и проверена на множестве экспериментальных данных подробная химическая кинетическая модель окисления этанола. Автор работы утверждает, что содержание в молекуле этанола гидроксильных групп способствуют интенсивному образованию активных кислородсодержащих радикалов $HCCO$, CNO , OH в процессе его горения. Повышение концентрации этих компонентов способствует снижению концентрации CH_3 и C_2H_2 , которые являются основными компонентами формирования ПАУ посредством метилирования, циклизации и дегидрирования. Таким образом низкое содержание ПАУ в пламени этанола приводит к дополнительному снижению общего процесса сажеобразования. Нами было установлено, что, организовав коаксиальное горение этанола и пропана можно существенно снизить процесса сажеобразования в диффузионном пламени пропана.

Список литературы

1. N. M. Marinov, "A detailed chemical kinetic model for high temperature ethanol oxidation," *International Journal of Chemical Kinetics*, 2015, vol. 31, no. 3, pp.183–220

**А.Ю. МАЛАХОВ, С.А. СЕРОПЯН, И.В. САЙКОВ,
И.В. ДЕНИСОВ**

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г.
Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ СИНТЕЗА NiAl В СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЕ

Разработан метод получения сваркой взрывом слоистого композиционного материала из стальных пластин и интерметаллидного соединения NiAl. Инициирование и синтез порошковой смеси происходило в процессе ударно- волнового нагружения. Данный способ позволяет получить многослойный материал за одну операцию без последующих технологических операций.

A.Yu. MALAKHOV, S. A. SEROPYAN, I. V. SAIKOV, I. V. DENISOV
*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of
Sciences, Chernogolovka, Russia*

SHOCK-WAVE INITIATION OF NiAl SYNTHESIS IN STEEL MATRIX

A method has been developed for obtaining by explosive welding a laminated composite from steel plates and the NiAl intermetallic compound. The initiation and synthesis of the powder mixture took place in the process of shock-wave loading. This method makes it possible to obtain a multilayer material in one operation without subsequent technological operations.

Интерметаллиды системы Ni-Al обладают высокой термической стабильностью, устойчивостью к окислению, твердостью и электропроводностью. Покрытия из этих материалов используются в качестве жаростойких защитных слоев [1]. Таким образом использование данного материала при получении металл-интерметаллидных слоистых композиционных материалов (МИСКМ) является перспективным направлением [2].

В работе представлен метод получения слоистого композиционного материала по следующей схеме: сварка взрывом многослойного пакета из стальных пластин и реакционноспособной порошковой смеси Ni-Al. Инициирование и синтез порошковой смеси происходит в процессе ударно-волнового нагружения.

Для реализации ударно-волнового инициирования и синтеза использовали порошковую смесь никеля ПНК УТ-3 и алюминия АСД-1 стехиометрического состава, ориентированного на получение целевого продукта NiAl.

Ударно-волновое нагружение проводилось при скорости соударения метаемой пластины с матрицей равной 1500 м/с в режиме косой ударной волны.

Ультразвуковой контроль показал 100% сплошность зоны сварки метаемой пластины с матрицей. Рентгенофазовый анализ синтезированной порошковой смеси показал, что в результате ударно- волнового нагружения (1500 м/с) в слое Ni-Al происходит экзотермическая реакция с образованием целевого продукта из интерметаллида NiAl.

Исследования границы соединения в полученном МИСКМ показали, что слой интерметаллида NiAl имеет пористую структуру (рис. 1) с микротвердостью от 861 HV до 1072 HV.

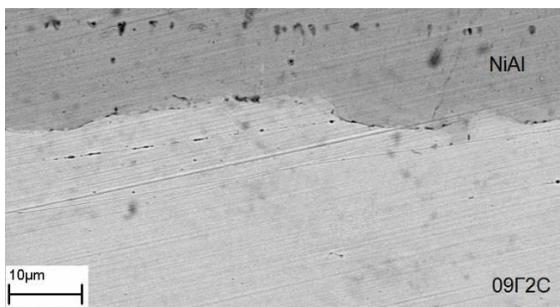


Рис. 1 Микроструктура границы соединения стальной матрицы и интерметаллидного слоя

Разработанный способ позволяет получать многослойный материал за одну операцию без использования последующего нагрева в печи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00754 А.

Список литературы

1. M. Shulpekov, R. M. Gabbasov. Coating in the Ni-Al system using the SHS method. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1115 (2018) 042061.
2. Manukyan K.V., Mason B.A., Groven L.J., Lin Y.C., Cherukara M., Son S.F., Mukasyan A.S. Tailored Reactivity of Ni+Al Nanocomposites: Microstructural Correlations, The Journal of Physical Chemistry C, 2012, № 116(39), P. 21027–21038.

С.П. МЕДВЕДЕВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.Н. ИВАНЦОВ, К.И.
КОВАЛЕВА, А.М. ТЕРЕЗА, С.В. ХОМИК

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ ФРАГМЕНТОВ МЕМБРАНЫ НА ТЕЧЕНИЕ В КОНИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ

В экспериментах по исследованию сферических ударных волн в конической ударной трубе установлено, что амплитуда волны сжатия оказывается меньше рассчитанной в предположении мгновенного удаления мембраны, разделяющей камеры высокого и низкого давления. Для интерпретации выявленного эффекта проведен анализ результатов численного моделирования, учитывающего влияние фрагментов оболочки на формирование и распространение ударной волны.

S.P. MEDVEDEV, E.K. ANDERZHANOV, A.N. IVANTSOV,
K.I. KOVALEVA, A.M. TEREZA, S.V. KHOMIK

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, RAS, Moscow, Russia

EFFECT OF MEMBRANE FRAGMENTS ON THE FLOW IN A CONICAL SHOCK TUBE

In experiments on the study of spherical shock waves in a conical shock tube, it was found that the amplitude of the compression wave turns out to be less than that calculated on the assumption of instantaneous removal of the membrane separating the high and low pressure chambers. To interpret the revealed effect, we analyzed the results of numerical modeling, taking into account the effect of shell fragments on the formation and propagation of a shock wave.

Разрыв газонаполненного сосуда высокого давления (СВД) представляет один из наиболее часто встречающихся типов аварии в современных энергоемких производственных системах. Основное поражающее действие СВД связывают с воздушными ударными волнами, формирующимися в окружающем пространстве (фугасное действие), а также с образующимися осколками (осколочное действие).

В [1] показано, что коническая ударная труба (КУТ) с разрывной мембраной, отделяющей коническую камеру высокого давления от ее продолжения – конической камеры низкого давления является эффективным инструментом для воспроизведения динамических нагрузок при сферическом разлете СВД. Тем не менее, при теоретическом описании рабочего процесса КУТ в [1,2] оказалось, что расчеты в предположении мгновенного удаления мембраны предсказывают завышенную интенсивность ударной волны по сравнению с экспериментально измеренной. В случае, когда толкающим газом является азот, это отличие

составляет около 30%. При переходе к гелию может наблюдаться двукратное различие. Для преодоления столь существенного расхождения необходим учет динамики раскрытия и движения мембраны.

Для интерпретации выявленных в экспериментах эффектов проведен анализ результатов численного моделирования, выполненного с использованием пакета газодинамических расчетов GAS DYNAMICS TOOL (GDT) [3]. Перемещение мембраны моделировалось с помощью, встроенной в пакет GDT процедуры расчета движения твердого тела в газовом потоке. Объектом моделирования являлась коническая ударная труба КУТ-38 длиной 1 м с углом раствора 38°. В расчетах варьировались давление разрыва и толщина (масса) мембраны. Показано, что на начальной стадии происходит струйное истечение. Ударная волна формируется на более поздней стадии, и ее интенсивность уже не соответствует параметрам при распаде разрыва. Показано, что уменьшение массы мембраны приводит к сокращению времени формирования ударной волны и росту ее интенсивности. Продемонстрировано влияние свойств толкающего газа. Выявленные особенности должны учитываться при обосновании методики моделирования действия взрыва с помощью конической ударной трубы. Полученные результаты полезны для оценки осколочного действия при разрыве сосудов высокого давления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00554)

Список литературы

1. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Хомик С.В. // Изв. РАН, МЖГ. 1997. №5. С. 144-161.
2. Медведев С.П., Иванцов А.Н., Михайлин А.И., Сильников М.В., Тереза А.М., Хомик С.В. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 3.
3. Зибаров А.В. Пакет прикладных программ GAS DYNAMICS TOOL и его применение в задачах численного моделирования газодинамических процессов. Дис. ...д-ра физ.-мат. наук: 05.13.16 - Тула, 2000, 307 с.

И.Н. МЕЛЬНИКОВ¹, Н.В. МУРАВЬЕВ¹, И.В. КУЧУРОВ², В.Г.
КИСЕЛЕВ^{1,3}, А.Н. ПИВКИНА¹

¹ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия

²ИОХ РАН, Москва, Россия

³ИХКГ СО РАН, Новосибирск, Россия

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ТЕРМОЛИЗА БИЦИКЛООКТОГЕНА ПО ДАННЫМ ТЕРМОАНАЛИТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И КВАНТОВОХИМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Кинетика термического разложения бициклооктогена в разбавленном растворе изучена методом дифференциальной сканирующей калориметрии, а закономерности распада описаны уравнением автокатализа. Механизм разложения ВСНМХ в газовой фазе изучен с помощью высокоточных квантовохимических расчетов. По результатам экспериментов и расчетов обнаружено, что роль первичной реакции принадлежит радикальному разрыву связи N-NO₂.

I.N. MELNIKOV¹, N.V. MURAVYEV¹, I.V. KUCHUROV²,
V.G. KISELEV^{1,3}, A.N. PIVKINA¹

¹FRCCP RAS, Moscow, Russia

²ZIOC RAS, Moscow, Russia

³ICKC SB RAS, Novosibirsk, Russia

KINETICS AND MECHANISM THERMOLYSIS OF BCHMX BASED ON THERMAL ANALYSIS STUDY AND QUANTUM CHEMISTRY CALCULATIONS

The kinetics of thermal decomposition of bicyclo-HMX in a dilute solution was studied by differential scanning calorimetry. The decay patterns are described by the autocatalysis equation. The decomposition mechanism of BCHMX in the gas phase was studied by high-level quantum chemical calculations. Based on the results of experiments and calculations, it was found that the role of the primary reaction belongs to the radical cleavage of the N-NO₂ bond.

Бициклооктоген (цис-1,3,4,6-тетранитрооктагидроимидазо-[4,5-d]-имидазол, ВСНМХ) – новое перспективное энергетическое соединение из класса нитраминов. Термическая стабильность ВСНМХ в газовой и

конденсированной фазах исследованы теоретически и экспериментально [1-3]. Сообщаемые значения энергии активации распада демонстрируют значительный разброс $E_a=163-229$ кДж/моль, а сведения о лимитирующей стадии механизма термоллиза противоречивы.

Цель данной работы состояла в определении механизма и достоверных кинетических параметров термического разложения ВСНМХ.

Разложение ВСНМХ в разбавленном растворе дибутилфталата изучалось методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при скоростях нагрева 2-40 К/мин. Для квантовохимических расчетов механизма разложения ВСНМХ использовался современный метод DLPNO-CCSD(T)/aug-cc-pVQZ, обеспечивающий высокую среднюю точность (~4 кДж/моль) при разумных затратах вычислительных ресурсов. В ходе моделирования рассмотрена серия первичных каналов: радикальный – разрыв N-NO₂ связи, и ряд молекулярных – отщепление HONO и изомеризации с участием нитроамино-групп.

Анализ данных ДСК, проведенный методами формальной кинетики, показывает, что разложение в растворе наилучшим образом описывается схемой с двумя параллельными реакциями: реакцией первого порядка и автокатализом первого порядка. Значения аррениусовских параметров некаталитической стадии составляют $E_a = 168,7 \pm 1,4$ кДж/моль, $\log(A, \text{с}^{-1})$

$= 15,7 \pm 0,2$ и в пределах погрешности согласуются с данными изотермического распада ВСНМХ [1].

Среди изученных первичных каналов разложения в газовой фазе наименьший активационный барьер 169 кДж/моль принадлежит радикальному разрыву связи N-NO₂. Следующей энергетически выгодной реакцией является отщепление HONO с барьером 186 кДж/моль. Учет влияния среды при помощи модели поляризуемого континуума с модельными растворителями бензолом и о-дихлорбензолом показывает, что механизм распада при переходе от газовой фазы к раствору сохраняется. Результаты доказывают мономолекулярный характер разложения ВСНМХ в растворе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №19-73-20217).

Список литературы

1. R.S. Stepanov; Kruglyakova, L. A. Russian Journal of General Chemistry **2010**, 80 (2), 316–322.
2. Ye, C.-C.; An, Q.; Goddard, W. A.; Cheng, T.; Zybin, S.; Ju, X. J. Phys. Chem. C **2015**, 150123143703008.
3. Elbeih, A.; Abd-Elghany, M.; Klapötke, T. M. Propellants Explos. Pyrotech. **2017**, 42 (5), 468–476.

Л.Р. ОБРУЧКОВА, В.П. ЕФРЕМОВ, А.Д. КИВЕРИН, И.С.
ЯКОВЕНКО

ОИВТ РАН, Москва, Россия

АНАЛИЗ РОЛИ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНАЦИИ В ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Методами численного моделирования исследовано гидродинамическое влияние микрочастицы на поток за фронтом ударной волны и последующее воспламенение. Для кислородно-воздушной смеси получена полная система термодинамических параметров, описывающих процесс. Оценены пределы инициирования детонации для различных концентраций горючей смеси. Указаны пространственные и временные ограничения использованных методов.

L.R. OBRUCHKOVA, V.P. EFREMOV, A.D. KIVERIN,
I.C. YAKOVENKO

IIT RAS, Moscow, Russia

ANALYSIS OF THE SINGLE PARTICLE ROLE AT DETONATION INITIATION BY SHOCK IN COMBUSTIBLE MIXTURE

The hydrodynamic effect of the microparticle on the flow beyond the shock wave front and the subsequent ignition is investigated by means of numerical simulating methods. For the stoichiometric mixture of hydrogen-oxygen, a complete thermodynamic system of characteristics describing the process is obtained. Detonation limits for different concentration rates of combustible mixture are obtained. Spatial and temporal limitations of the methods used are shown.

Исследование детонации горючих смесей на протяжении многих лет остается одной из актуальных задач физики горения и взрыва. В настоящее время значимость исследований инициирования детонации только усиливается вследствие необходимости обеспечения безопасных режимов работы различных промышленных установок, в том числе крупных энергетических установок.

Экспериментальные данные о влиянии помещенных в газовый поток твердотельных частиц противоречивы. С одной стороны, добавление мелкой

пыли во взрывчатые газовые смеси является широко используемым методом для подавления взрывов. Но при этом имеются свидетельства обратного эффекта, когда при внесении частиц в поток пределы инициирования детонации расширяются, то есть частички могут выступать в роли промоутеров инициирования детонации. Неопределенность в экспериментальных данных о влиянии частиц вносят и экспериментальные сложности наблюдения за отдельной движущейся микрочастицей и в первую очередь задымление потока. Вследствие того, что засеянный микрочастицами поток является непрозрачным, рассмотреть детали процесса воспламенения невозможно. Всё это определило мотивацию настоящей работы. Цель работы: численно исследовать влияние отдельной микрочастицы на процесс инициирования детонации в двухфазном потоке.

Предположим, что в газе присутствует изначально неподвижная микрочастица. При взаимодействии ударной волны с находящейся в потоке частицей характеристики потока в окрестности частицы изменяются. От переднего края частицы в направлении обратного потоку отходит отраженная ударная волна. За фронтом отраженной волны перед частицей создается область дозвукового течения, при этом газ в этой области нагреет в результате двухкратного сжатия в падающей и отраженной ударной волне. Именно в этой области непосредственно вблизи поверхности частицы становится возможным инициирование детонации. При этом интенсивность первичной ударной волной может быть недостаточной для инициирования детонации в газе без частиц [1-3]. Учет химических реакций в потоке горючего газа позволяет численно оценить пределы детонации в горючих смесях различного состава.

Показано, что в присутствии частицы в горючей смеси время задержки воспламенения исследованных составов уменьшается на порядок по сравнению с чистой смесью. Определено влияние частицы на поля температур, давлений и скоростей в окрестности частицы. Показано, что для достижения критических параметров в богатых водородно-кислородных смесях требуется существенно более интенсивное воздействие на среду.

Список литературы

Обручкова Л.Р., Балдина Э.Г., Ефремов В. П. Газодинамические и силовые эффекты, связанные с твердотельной частичкой, в условиях ударной волны в воздухе // Теплоэнергетика, 2017, № 3, с. 77–87

Efremov V.P., Obruchkova L.R., Kiverin A.D., Ivanov M.F. Limits of shock wave ignition of hydrogen–oxygen mixture in the presence of particles J. Phys.: Conf. Ser., 2017, 946, 012073

1. Efremov V P, Obruchkova L R and Kiverin A D Influence of particle on gas detonation by shock // Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences, 2019, No. 6, pp. 67–82.

В.А. ПУШКОВ, Ю.В. БАТЬКОВ

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

ИЗУЧЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Приведен краткий обзор работ по исследованию ВВ при механическом динамическом воздействии. Рассмотрены некоторые аспекты инициирования взрывчатого превращения при динамическом деформировании.

V. A. PUSHKOV, Y. V. BATKOV

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

STUDY OF HE UNDER DYNAMIC LOADING

The short review of works on research of HE under mechanical dynamic loading are presented. Some aspects of initiation of explosive transformation under dynamic de- forming are considered.

Отдельным направлением исследований ВВ является исследование низкоскоростного (до ~100 м/с) механического воздействия на ВВ, отвечающего аварийным нагрузкам при перевозке, теракте и т.п. [1]. Испытания проводят с помощью удара падающего стального груза по прибору из двух стальных роликов, между которыми помещается небольшая навеска испытуемого ВВ. Испытания эти стандартизованы, ГОСТ Р50835-95. Испытания по изучению характеристик ВВ при динамическом нагружении имеют широкий спектр различных методик. Так, например, в Российском РФЯЦ-ВНИИЭФ исследуют воздействие на ВВ сферических осколков или стального штыря при скоростях ~6 - 60 м/с [2]. В исследованиях, в частности, определяют динамику распространения взрывчатого превращения и его параметры. Изучают низкоскоростное воздействие на ВВ стального ударника по методу «теста Стивена» на ударных стендах типа «Ствол», применяя в опытах радиоинтерферометр и ПВДФ-датчики давления [3], [4]. В опытах определяют место и время появления очага взрывчатого превращения, а также скорость его распространения. Исследования механических воздействий на ВВ с применением, например, тестов Стивена, Сьюзан и других методов проводятся и за рубежом [4-7].

Разработка физических моделей и количественное описание процессов деформирования, разрушения и возбуждения взрывчатого превращения в ВВ на сегодня далеко не закончены. Поэтому исследование ВВ при динамическом нагружении продолжают для получения большего объема данных и построения моделей. Так, например, в [8] при динамическом воздействии исследовалось ВВ с помощью метода составного стержня Гопкинсона (ССГ) [9], модернизированного для изучения локализованного сдвига. При скоростях деформации $\dot{\epsilon}=2100\text{--}2500\text{ с}^{-1}$ происходило разрушение образцов с проявлением взрывчатого превращения (ВП) [8]. Данные в [8] соответствуют широко применяемой теории о возбуждении ВП, основанной на формировании очагов ВП на сдвиговых деформациях с образованием трещин и скольжением материала ВВ по границам трещин. Данные различных исследователей будут полезны для моделирования ВВ при динамических нагрузках и для разработки механизма развития ВП.

Список литературы

1. Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом // М.: Наука. - 1968.
2. Белов Г.В., Базаров Ю.Б., Екимчев С.Н., Жиембетов А.К., Кудашов А.В., Олейников И.В., Шишканов А.В., Шустова Н.И. Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных ВВ.// Труды XV Харитоновских Чтений, РФЯЦ- ВНИИЭФ, Саров. – 2013. – С. 111–118.
3. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов. // Физика горения и взрыва. - 2011.- Т. 47. – N 6. - С. 29-41.
4. Бельский В. М., Богданов Е. И., Борисенко В. А., Ботов Е. В., Ишеев Д. М., Кручинин В.А., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А., Хворостин В.Н., Lapebie E., Gallic C. Le, Mateille P. Система диагностики, включающая радионтерферометр и ПВДФ- датчик давления, для экспериментов типа тест Стивена. // Труды XI Харитоновских Чтений, РФЯЦ- ВНИИЭФ, Саров. – 2011. – С. 703-708.
5. Chidester S.K., Tarver C.M., DePiero A.H., Garza R.G. Single and multiple impact ignition of new and aged high explosives in the Stiven impact test // AIP Conference. Proceedings 505. – 2000. – P. 663–666.
6. Джексон Р., Грин Л., Барлетт Р., Хоуфер У., Крамер П., Ли Р., Э. Нидик-мл., Шоу Л., Вейнгарт Р. Закономерности инициирования и распространения детонации во взрывчатом веществе ТАТБ. // Детонация и взрывчатые вещества: сборник. – М.: Мир, 1981. – С. 323– 342.
7. Kerly G.I. Theoretical model of explosive detonation products: test and sensitivity studies // Proc. of 9th Symp. on Detonation. Office of Naval Res. - 1990. - P.443-451.
8. В.А. Пушков, А.М. Васильев, А.В.Юрлов, и др. Реакция ВВ на основе октогена и ТАТБ на динамическое нагружение методом составного стержня Гопкинсона. Доклады XIX Харитоновских Чтений, ИПК РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2018, стр.197-206
9. Kol'sky H, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading" / Proceedings of the Physical Society, Section B, 62, 1949 – pp. 676-700.

А.И. САВВАТИМСКИЙ^{1,2}, С.В. ОНУФРИЕВ¹, Г.Е. ВАЛЬЯНО¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

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

ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ ГРАФИТА (ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ)

Рассмотрены эксперименты последних лет по исследованию углерода при быстром нагреве однократным импульсом тока [1]. Представлены данные по измерению теплоемкости жидкого углерода C_v (при ограничении расширения образца графита, зажато в стекле ТФ-5). Получена величина $C_v = 2$ Дж/г·К. Представлены доказательства неверной оценки давления графита; (утверждение [2] о равенстве T плавления графита ~ 6300 К при давлении $P \sim 3$ кбар).

SAVVATIMSKIY^{1,2}, S.V. ONUFRIEV¹, G.E. VALIANO¹

¹Joint institute for high temperature RAS, Moscow, Russia

²Physical Institute named after P.N. Lebedev RAS, Moscow, Russia

GRAPHITE PULSE HEATING (HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES)

Recent experiments on the study of carbon under rapid heating by a single current pulse are considered [1]. Data on the measurement of the specific heat of liquid carbon C_v (with limited expansion of the graphite sample clamped in the TF-5 glass) are presented. The value $C_v = 2$ J/g·K is obtained. Proofs of the incorrect estimation of graphite pressure are presented; (the statement [2] about the equality of the melting point of graphite ~ 6300 K at a pressure of $P \sim 3$ kbar).

Теплоемкость C_v графита в жидком состоянии

Графит, толщиной 34 микрона, клеивался в ячейке, состоящей из двух толстостенных пластин стекла (тяжелый флинт ТФ-5). Нагрев образца до получения жидкой фазы происходил за время $\sim 3-5$ мкс [1]. Получена теплоемкость при постоянном объеме $C_v \approx 2$ Дж/г·К от 5500 К вплоть до 7000 К для жидкого углерода.

Линия плавления графита

Рассмотрены эксперименты последних лет по исследованию графита при высоких P и T [1]. В 2019 году [2] демонстрируется плавление графита в условиях плотной упаковки пластинки графита между сапфировыми и кварцевыми пластинами. Укажем, о чем умолчали авторы при публикации рис.1.

1. В работе Байтина и др (кружки на рис.1) должно быть показано плато плавления при 5000 К (для давления аргона 2 кбар !).

2. На рис.1 приводится прямая линия расчетных данных JANAF (квадраты) до 6000 К. Работа JANAF является расчетной, и приведена для давления 1 бар (т.е. меньше давления в тройной точке). Авторы [2] на эти существенные особенности – не обращают внимания.

3. Напомним, что Банди получил [3] для начала плавления графита введенную энергию $E = 13,2$ кДж/г при давлении 48 кбар ! Энтальпия в начале плавления графита для кварцевых пластин (1 на рис.1) приведена как $E = 13$ кДж/г и $E \approx 15$ кДж/г для сапфировых пластин (2 на рис.1).

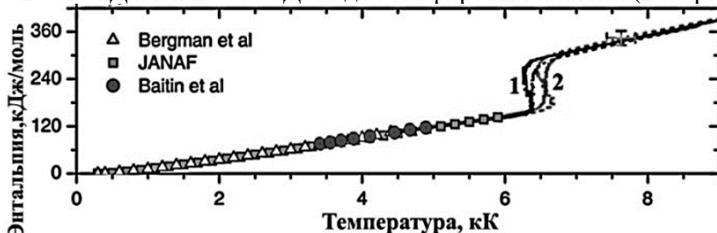


Рис. 1. Получено: в начале плавления $T \sim 6300$ К при давлении около 3 кбар [2]. (1- кварцевое стекло; 2 – сапфир). Давление P в [2] рассчитано неверно из-за ошибки при измерении расширения. С учетом эксперимента [3] порядок давления должен составлять 30-40 кбар. Подробности – в [1].

Индикатор.ру публикует сообщение о недостоверной работе [2] под заголовком: «Впервые исследованы свойства жидкого углерода» [4].

Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 19-79-30086, руководитель Г.А. Месяц)

Список литературы

1. Савватимский А.И., Онуфриев С.В. Исследование физических свойств углерода при высоких температурах (по материалам экспериментальных работ), УФН, 2020, №10, 1085- 1108.
2. Kondratyev A M Rakhel A D Physical review letters **122** 175702 (2019).
3. Bundy F P, J Chem Phys, 1963, 38, 618.
4. <https://indikator.ru/chemistry-and-materials/svoystva-zhidkogo-ugleroda-14-05-2019.htm>

**В.А. СМЕТАНИЮК, И.А. САДЫКОВ, А.С. СИЛАНТЬЕВ, С.М.
ФРОЛОВ**

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова
Российской академии наук, Москва, Россия*

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ГАЗОДЕТОНАЦИОННАЯ ШТАМПОВКА ПЛОСКИХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В работе исследовано циклическое воздействие импульсной газовой детонации на листовые металлические заготовки различной толщины. Проведены эксперименты с листовыми заготовками различных материалов с одновременным механическим и термическим воздействиями. В экспериментах варьировали частоту циклов, длительность и интенсивность механического воздействия, а также температуру и скорость нагрева заготовок.

**V.A. SMETANYUK, I.A. SADYKOV, A.S. SILANTIEV,
S.M. FROLOV**

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

CYCLIC GAS DETONATION SHAPING OF FLAT BODY PARTS

The cyclic effect of pulsed gas detonation on sheet metal blanks of various thicknesses is investigated. Experiments are carried out with sheet blanks of various materials with simultaneous mechanical and thermal effects. In the experiments, the frequency of cycles, the duration and intensity of mechanical action, as well as the temperature and rate of heating of the workpieces is varied.

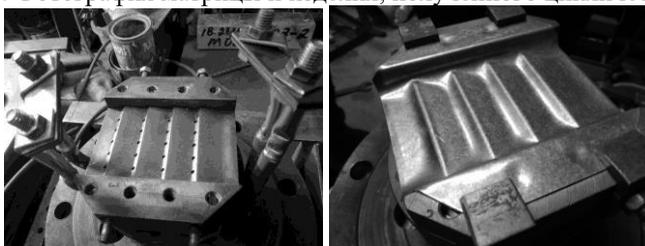
В промышленности для мелкосерийного производства штампованных деталей наибольшее распространение получили методы импульсной штамповки ударной волной (УВ) с использованием конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Способ штамповки взрывом конденсированных ВВ обладает рядом недостатков: (1) высокие требования к обеспечению безопасности персонала, технологическим процедурам и помещениям; (2) одиночное воздействие УВ на обрабатываемую заготовку (для повторного воздействия необходимо повторение сложной технологической операции); (3) не-

возможность одновременной термической и механической обработки детали.

Использование в качестве взрывного источника газовых горючих смесей исключает описанные недостатки. Нагрев заготовки горячими продуктами горения/детонации газовой смеси и периодическое ударно-волновое воздействие позволяет штамповать заготовки из низкопластичных жаропрочных сплавов.

В данной работе создана лабораторная установка для циклического воздействия газовой детонацией на листовую заготовку, установленную в профилированную матрицу. Установка состоит из двух функциональных секций: секции №1 для генерации детонационных волн в газовой смеси и штамповочной секции №2 с установленной матрицей и заготовкой. Секция №1 заполняется стехиометрической метано-кислородной смесью. После поджига смеси слабым электрическим разрядом в ней формируется детонационная волна (ДВ), которая перепускается в штамповочную секцию №2, где ДВ оказывает одновременное термическое и механическое воздействие на заготовку из листового металла. Частота циклической работы не превышает 3 Гц. В процессе циклической работы установки контролируется средняя температура матрицы. Эксперименты проводятся в двух режимах: 1 – циклическое ударно-волновое воздействие и нагрев заготовки продуктами детонации, 2 – предварительный нагрев заготовки в дефлаграционном режиме и последующее циклическое ударно-волновое воздействие с поддержанием стационарной температуры заготовки. На рисунке 1 (а) и (б) представлены фотографии матрицы и отштампованной детали.

Рисунок 1: Фотография матрицы и изделия, полученного циклическим



воздействием газовыми детонационными волнами.

Список литературы

1. Фролов С.М., Сметанюк В.А., Фролов Ф.С. Способ детонационной штамповки и устройство для его реализации. Заявка PCT от 2014 г.; Methods of detonation stamping and device for its realization. Frolov S.M., Frolov F.S., Smetanyuk V.A. PCT patent application PCT/RU2014/000780 of 16.10.2014, priority date 16.10.2014

А. С. СИЛАНТЬЕВ, С. М. ФРОЛОВ, В. А. СМЕТАННЮК, И. О.
ШАМШИН, В. С. АКСЁНОВ, И. А. САДЫКОВ

*Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва 119991, Россия*

ГАЗИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ СИЛЬНО ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ, ПОЛУЧАЕМЫМ ДЕТОНАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

Представлены результаты испытаний инновационной лабораторной установки по анаэробной газификации органических отходов в синтез-газ ($\text{CO}+\text{H}_2$) с помощью сильно перегретого водяного пара, получаемого циклической детонацией тройной смеси «метан-кислород-водяной пар» в импульсно-детонационном пароперегревателе.

A.S. SILANTIEV, S. M. FROLOV, V.A. SMETANYUK,
O. SHAMSHIN, V. S. AKSENOV, I. A. SADYKOV

*N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia*

GASIFICATION OF ORGANIC WASTE WITH STRONGLY SUPERHEATED WATER STEAM OBTAINED BY THE DETONATION METHOD

Presented are the results of testing the innovative laboratory-scale installation for organic waste anaerobic gasification to syngas (CO and H_2) with highly superheated steam produced by cyclic detonations of ternary methane-oxygen-steam mixtures in the pulsed detonation steam superheater.

Научно-исследовательская работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме № 0082-2019-0006 (номер гос. регистрации АААА-А21- 121011990037-8).

В соответствии с результатами работ [1, 2],

- (1) циклическая детонация тройной смеси «метан–кислород–водяной пар» позволяет получать сильно перегретый пар с температурой выше 2500 К при атмосферном давлении;
- (2) для получения детонации в такой тройной смеси максимальное

объемное содержание низкотемпературного водяного пара может достигать 40%;

- (3) переработка органических нетоксичных и токсичных отходов таким сверхперегретым водяным паром сопровождается их пиролизом, термическим разложением и полной газификацией без пирокарбонного остатка;
- (4) результат газификации — синтез газ (CO и H_2), который может быть использован в качестве горючего в установке для производства тепла/электричества и в качестве сырья для производства метанола и синтетических моторных топлив.

На основе результатов [1, 2] в ФИЦ ХФ РАН создана лабораторная установка – «детонационный конвертор твердых и жидких отходов». Установка выполнена на основе детонационной трубы диаметром 50 мм, смесительно-зажигательного устройства (СЗУ), систем подачи метана и кислорода, системы подачи низкотемпературного пара, дозатора сыпучего или форсунки жидкого материала, 40-литрового проточного реактора, присоединенного к теплообменнику-холодильнику, конденсатоотводчиков, сепаратора-барботёра, пробоотборника, горелки, блока управления, а также систем диагностики и управления. В качестве сыпучих органических отходов для газификации использовались отходы кофейных машин, древесные опилки, лигнин и др. В качестве жидких отходов использовалась водно-угольная суспензия. Предварительный анализ состава сухих продуктов газификации, при различных соотношениях газифицирующих агентов (водяной пар и CO_2) и отходов показал, что они включают до 75% горючих газов – H_2 , CO и CH_4 – и до 25% CO_2 . Поскольку теоретически при правильном подборе режима работы установки с органическими отходами в реакции газификации должен потребляться весь водяной пар, потенциал значительного повышения доли горючего газа в продуктах газификации еще остается. Дальнейшая работа будет направлена на повышение эффективности газификации и масштабирование производительности конвертора твердых и жидких отходов до опытно-промышленного уровня.

Список литературы

1. Фролов С.М., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Набатников С. А. Способ получения сильно перегретого пара и устройство детонационного парогенератора (варианты). Патент РФ №2686138 от 24.04.2019.
2. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Shamshin I. O. and others // Appl. Therm. Eng., 2021, V.183, P.116195. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116195.

А.М. ТЕРЕЗА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.С. БЕТЕВ, С.П.
МЕДВЕДЕВ, С.В. ХОМИК, Г.Н. МОХИН

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва,
Россия*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА

Проведено численное моделирование термической конверсии (ТК) газообразных продуктов пиролиза (ГПП) полипропилена (ПП) с использованием нескольких детальных кинетических механизмов (ДКМ) в диапазоне начальной температуры T_0 от 600 К до 1200 К и давлении 1 атм. Получены характерные особенности роста концентрации метана и водорода с одновременной убылью углеводородов C_2+ . Определены закономерности тепловыделения в процессе ТК и установлено, что продуктами конверсии, наряду с метаном и водородом, являются ароматические соединения C_6+ .

A.M. TEREZA, G.L. AGAFONOV, E.K. ANDERZHANOV,
A.S. BETEV, S.P. MEDVEDEV, S.V. KHOMIK, G.N. MOKHIN

*N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

CHARACTERIZATION OF THERMAL CONVERSION OF GASEOUS PRODUCTS OF POLYPROPYLENE PYROLYSIS

Numerical simulation of thermal conversion of gaseous products of polypropylene (GPPP) pyrolysis using several detailed kinetic mechanisms (DKMs) is performed at atmospheric pressure in the range of initial temperatures from 600 to 1200 K. Characteristics of the increase in methane and hydrogen concentrations associated with consumption of C_2+ hydrocarbons are obtained. Temporal variation of the heat release rate in the course of thermal conversion is determined. It is found that the conversion products, along with methane and hydrogen, contain aromatic C_6+ compounds.

Утилизация отходов, содержащих ПП, требует рационального подхода, продиктованного энергоэффективностью и получением на выходе экономически и экологически выгодных химических соединений. Одним из таких путей является поэтапный пиролиз ПП, когда продукты его газификации подвергаются дальнейшей ТК.

В представленной работе проведено численное моделирование ТК смесей ГПП ПП при

$V = \text{const}$, в диапазоне начальной температуры $600 \text{ K} \leq T_0 \leq 1200 \text{ K}$ и при давлении 1 атм. Использовался программный модуль CHEMKIN III [1]. Исходные данные смесей были взяты из [2]. Установлено, что ТК имеет характерный индукционный период $t_{\text{ind.}}$, в течение которого все концентрации исходных углеводородов C_{2+} либо динамично уменьшаются, либо незначительно изменяются вблизи своего начального значения. Окончание $t_{\text{ind.}}$ характеризуется резким ростом концентрации CH_4 и H_2 и повышением температуры. Обнаружено, что все ДКМ предсказывают симбатность роста профилей концентрации CH_4 и температуры с достижением ими своих максимальных значений. Все ДКМ предсказывают близкий уровень выхода CH_4 и H_2 при почти одинаковом тепловыделении. В тоже время значения $t_{\text{ind.}}$, рассчитанные при разных ДКМ, могут отличаться более чем на порядок. С ростом T_0 в процессе ТК $t_{\text{ind.}}$ сокращается и фактически исчезает, а тепловыделение уменьшается. Убыль исходных углеводородов C_{2+} в расчетах по всем ДКМ приводит к образованию ароматических соединений C_{6+} . При этом разные ДКМ предсказывают выход отличающихся между собой ароматических углеводородов. Среди них лишь бензол является единым продуктом по расчетам всех ДКМ.

Численное моделирование по всем используемым ДКМ показало, что в процессе ТК ГПП ПП образуется как легкая смесь метана с водородом, так и фракция тяжелых ароматических углеводородов C_{6+} . Данный результат позволяет при утилизации отходов ПП производить разделение этих фракций посредством охлаждения.

Список литературы

1. Kee R.J., Rupley F.M., Meeks E., Miller J.A. CHEMKIN III: Tech. Report № SAND96-8216. Livermore, CA: Sandia National Laboratories, 1996.
2. Фролов С.М., Звегинцев В.И., Аксёнов В.С., и др. Горение и взрыв. **11** (4), С. 44–60, 2018.

ЩЕГОЛЬКОВА И.В., АБДУЛКАРИМОВА Р.Г., ВОНГАЙ И.М., МАКУЛБЕК
Н.Т.

Казахский национальный университет имени аль – Фараби, Алматы, Казахстан

РАСЧЕТ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ КАМЕР ВЫСО- КОГО ДАВЛЕНИЯ В ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ С МЕМБРАННОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

Исследованы пиротехнические составы энергоемких смесей в качестве генераторов импульсов зажигания пиротехнических систем. Определены временные и удельные параметры инициирующего потока, подобраны рецептуры пиротехнических смесей и формы их применения. Изучено влияние мембраны различного состава и геометрии на рабочие характеристики зажигательных устройств.

CHSHEGOLKOVA I.V., ABDULKARIMOVA R.G., VONGAI I.M.
MAKULBEK.N.T.

Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

CALCULATION OF PYROTECHNIC CHARGES OF HIGH – PRESSURE CHAMBERS IN PYROTECHNIC PRODUCTS WITH A MEMBRANES

Pyrotechnic compositions of energy-intensive mixtures as generators of ignition pulses of pyrotechnic systems have been investigated. The time and specific parameters of the initiating flow were determined; the composition of pyrotechnic mixtures and forms of their applications were identified. The influence of different composition and geometry of membranes on the performance characteristics of incendiary devices have been studied.

В настоящее время для создания давления в пиротехнических устрой- ствах различного типа все большее внимание уделяют пиротехническим составам, в результате работы которых выделяется значительное количе- ство газообразных продуктов, и все меньше используют взрывчатые ве- щества. Зачастую, эти требования диктуются необходимостью снижения ударных нагрузок, действующих на окружающие элементы конструкции, как в случае применения в пиротехнических болтах [1]. С другой сторо- ны, в некоторых пиротехнических изделиях необходимо создание требуе- мого давления для разрыва мембранной перегородки и выброса разогретых продуктов горения на следующую огневую цепь.

При проектировании пиротехнических изделий такого типа необходимо знать какое максимальное давление необходимо для разрыва мембранной перегородки. Этот параметр можно с достаточной точностью рассчитать, исходя из материала перегородки, ее толщины и периметра высекаемого канала [2]. Довольно просто и понятно этот расчет представлен в работе [1]. В то же время возникает обратная задача, связанная с нахождением необходимой массы пиротехнического заряда при заданных параметрах камеры и рассчитанном давлении разрыва мембраны. Подробный расчет массы пороховых зарядов в сопловых установках представлен в работе [3]. Пиротехнические составы в свою очередь могут дать гораздо больший импульс зажигания за счет образования большого количества конденсированных разогретых продуктов (сгорающий в атмосфере избыточный алюминий), что в свою очередь приведет к увеличению времени тепловой экспозиции импульса.

В работе исследованы пиротехнические составы энергоемких смесей в качестве генераторов импульсов зажигания. Проанализированы рецептуры на основе нитратов и перхлоратов калия, с магнием, алюминием и их сплавами. В качестве эталона для сравнения работы состава был взят дымный ружейный порох ДРП №3 (размер зерна пороха составляет 0,15 – 0,25 мм). Для обеспечения единой плотности заряжания состав гранулировали до размерности зерна 0,15 – 0,20 мм. При этом в работе экспериментально определены необходимые массы порохового и пиротехнического зарядов для обеспечения пробития оболочки. Проведено сравнение расчетных данных массы зарядов с экспериментальными.

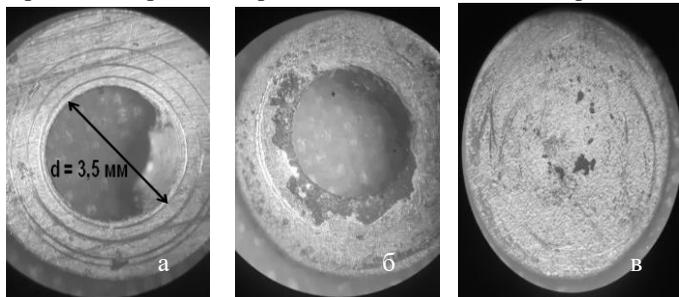


Рисунок 1 - Разрушение алюминиевой мембраны после отработки заряда в камере высокого давления

а) порох (ДРП), б) пиротехнический состав ($KClO_4/Al/связ.$); в) отсутствие разрыва

Список литературы

1. И.Д. Самойленко, В.В. Волошин, В.И. Онофриенко, Д.Н. Безкорсый. Космическая техника. Ракетное вооружение. Space Technology. Missile Armaments. 2020. Вып 1 (119).
2. В.В. Белов. Штампы для листовой штамповки. Расчет и конструирование.
3. В.Л. Руденко, В.М. Замаруев, В.И. Фалалеев. Расчет массы пороховых зарядов и уровня максимального давления в сопловых установках. Химическая физика и мезоскопия. Т. 8, № 3.

Ю.А. БОГДАНОВА¹, С.А. ГУБИН¹, Д.Н. БОЯРСКИХ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²АО «НПО ЭНЕРГОМАШ» им. академика В.П. Глушко, Химки, Россия

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА РАЗДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРУЕМЫХ СВОЙСТВ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

Рассмотрены способы разделения межмолекулярного потенциала взаимодействия в соответствии с термодинамической теорией возмущений для моделирования свойств бинарных систем в широкой области давлений и температур. Показано влияние версии теории возмущений на точность рассчитываемых термодинамических параметров бинарных смесей.

Yu.A. BOGDANOVA, S.A. GUBIN, D.N. BOYARSKIKH²

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

²NPO ENERGO MASH, Himki, Russia

INFLUENCE OF THE METHOD OF SEPARATION OF THE INTERACTION POTENTIAL ON THE ACCURACY OF THE SIMULATED PROPERTIES OF BINARY MIXTURES BASED ON THE THERMODYNAMIC PERTURBATION THEORY

Methods for separating the intermolecular interaction potential are considered in accordance with the thermodynamic perturbation theory when simulating the properties of binary systems in a wide range of pressures and temperatures. The influence of the version of the perturbation theory on the accuracy of the calculated thermodynamic parameters of binary mixtures is shown.

Теория возмущений позволяет получать термические уравнения состояния (УРС) веществ, которые реалистично описывают их свойства в широком диапазоне давлений и температур. Теория возмущений применима к любым газообразным или конденсированным системам, в которых имеются взаимодействия, описываемые парным сферически-симметричным потенциалом.

Термодинамические теории возмущений различаются методикой разделения потенциала взаимодействия на базисную и возмущающую части, а также критерием для оценки диаметров твердых сфер [1–3]. В зависимости от этого результаты расчетов термодинамических параметров веществ могут расходиться

по точности и диапазонам температур и давлений, для которых данная методика применима.

В настоящей работе для случая бинарных смесей расширены известные версии теории возмущений [1–3], предложенные для однокомпонентных систем. С использованием разработанной авторами модели УРС[4] исследованы основные способы разделения потенциалов для выявления наиболее точной методики при моделировании бинарных смесей. Верификация проводилась путем сравнения результатов расчетов термодинамических параметров бинарных смесей гелия и водорода с данными моделирования Монте-Карло, а также свойств бинарных смесей атомов и молекул азота и кислорода, образующихся в результате ударно-волнового сжатия жидких N_2 , O_2 , с экспериментальными данными и данными моделирования Монте-Карло. Для описания межмолекулярного взаимодействия был выбран модифицированный потенциал Букингема Ехр-6.

Суммарная статистика максимальных и средних отклонений значений давления от данных МК для исследуемых в работе бинарных смесей представлена в таблице.

Таблица. Статистика относительных отклонений рассчитанных в настоящей работе значений давления бинарных смесей от результатов МК

Версия теории возмущений	KLR R[1]	BH[2]	WCA[3]
<i>Среднее/максимальное значение модуля отклонения, δP, %</i>			
H_2 -He	1,45/5 ,21	4,13/1 0,66	4,75/12, 58
N_2 -N	3,46/9 ,78	17,04/ 21,16	20,78/2 7,63
O_2 -O	2,36/4 ,96	10,32/ 14,33	14,09/2 0,71

Как видно из таблицы, способ разделения потенциала версии KLRR[1] теории возмущений наилучшим образом описывает свойства бинарных смесей. Методики разделения потенциалов [2, 3] были изначально разработаны для однокомпонентных систем, поэтому их применение для моделирования свойств бинарных систем не является реалистичным.

Список литературы

1. Kang H.S., Lee C.S., Ree T., Ree F.H. // J. Chem. Phys. 1985. V. 82. № 1. P. 414.
2. Henderson D., Barker J.A. // J. Chem. Phys. 1967. V. 47. № 11. P. 4714.
3. Weeks J.D., Chandler D., Andersen H.C. // J. Chem. Phys. 1971. V. 54. P. 5237.
4. Bogdanova Yu.A., Gubin S.A., Victorov S.B., Gubina T.V. // High Temperature. 2015. V. 53. № 4. P. 481

Ю.А. БОГДАНОВА, В.А. ВЫСОЦКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СВОЙСТВ ПЕРЕНОСА МЕДИ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

Методом молекулярно-динамического моделирования исследованы свойства меди при изотермическом и ударно-волновом сжатии в области давлений от 5 до 3000 кбар и температур от 293,15 до 1500 К. Для описания взаимодействия между атомами меди использовалась модель погруженного атома. Рассчитаны функции радиального распределения и среднеквадратичное отклонение атома меди в зависимости от времени. На основании полученных результатов определены коэффициенты самодиффузии, а также фазовое состояние вещества.

Y.A. BOGDANOVA, V.A. VYSOTSKIY

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

MODELING OF THERMOPHYSICAL AND TRANSPORTING PROPERTIES OF COPPER IN A HIGH-PRESSURE AREA

Molecular dynamics modeling of isothermal and shock compression of a copper supercell is performed using the submerged atom model. Transport and thermophysical properties are considered at pressures from 5 to 3000 kbar and temperatures from 293.15 to 1500 K. The function of the radial distribution and the standard deviation of the atom as a function of time are analyzed, on the basis of which the self-diffusion coefficient is calculated and the phase state of the substance is established. A simulation of shock wave compression is performed, which results in the construction of the shock adiabat of the substance. The applicability of the model was evaluated and the results were verified.

Молекулярно-динамическое моделирование является современным инструментом для определения не только теплофизических свойств веществ в различных агрегатных состояниях, но и позволяет рассчитать свойства переноса, такие как вязкость и диффузия. Методы молекулярной динамики основаны на решении классических уравнений движения частиц в некотором выделенном объеме среды.

Данная работа посвящена определению теплофизических свойств и свойств переноса меди методом молекулярной динамики. Для описания межчастичного взаимодействия использовалась квази-многоатомная модель погруженного

атома EAM. Моделирование в данной работе проводилось с использованием программного пакета LAMMPS [1].

Для расчета параметров меди использовалась расчетная суперячейка в форме куба $7 \times 7 \times 7$ элементарных ячеек. При проведении МД моделирования по всем трём пространственным направлениям использовались периодические граничные условия. Шаг по времени составлял 0,1 фс, общее время расчета 200000 шагов, т.е. 20 пс. Моделирование выполнялось в NPT-ансамбле.

Путем анализа траектории движения атомов можно определить термодинамические свойства системы (температуру, давление), коэффициенты переноса, а также структурные и фазовые изменения.

Проведены серии численных экспериментов по расчету теплофизических свойств меди (плотность, энергия, коллективная динамика атомов):

1. расчет на изобаре 5000 бар при температурах от 300 до 1500 К;
2. расчет на изотермах 298,15 К и 1500 К в диапазоне давлений от 1 ГПа до 30 ГПа.

В результате молекулярно-динамического моделирования рассчитана плотность меди в зависимости от давления вдоль заданных изотерм в хорошем согласии с экспериментальными данными и расчетами других авторов.

Получены функции радиального распределения и среднеквадратичные отклонения атома от положения равновесия в расчетной ячейке меди, необходимые для расчета свойств переноса и определения фазового состояния меди при заданных давлении и температуре.

Метод вычисления коэффициента самодиффузии при МД моделировании основан на формуле Эйнштейна – Смолуховского [2]. В случае трехмерной диффузии производная среднеквадратичного отклонения по времени пропорциональна коэффициенту диффузии.

Фазовое состояние и область плавления кристалла меди идентифицировались по результатам анализа значений расчетной функции радиального распределения и среднеквадратичного отклонения атомов кристалла.

На основании полученных результатов показано, что на изотерме меди с возрастанием давления диффузия затрудняется.

Список литературы

1. <https://lammps.sandia.gov/>
2. С.С. Воюцкий// Курс коллоидной химии. 1976, с. 64

С.В. ГОРКУНОВ, В.А. ШАРГАТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассматривается задача образования ударных волн в результате быстрого разложения высокоэнергетических соединений в металлическом корпусе. Предложена методика, позволяющая проводить численное моделирование в трёхмерной постановке всех этапов развития процесса, включая: разложение высокоэнергетических соединений, деформацию и разгон металлического корпуса, образование облака продуктов разложения, формирование и распространение ударной волны в воздухе. Проведенный численный расчет эксперимента [1] показал хорошие согласие полученных профилей давления.

S.V. GORKUNOV, V.A. SHARGATOV

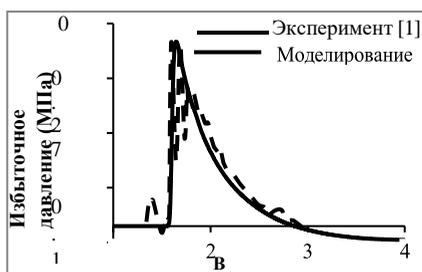
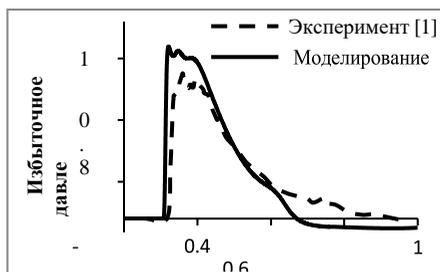
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SIMULATION OF SHOCK WAVE FORMATION AS A RESULT OF THE RAPID OF HIGH-ENERGY COMPOUNDS

The problem of the formation of shock waves as a result of the rapid decomposition of high-energy compounds in a metal case is considered. A technique has been proposed makes it possible to carry out numerical modeling of all stages of the process, including: decomposition of high-energy compounds, deformation and acceleration of a metal case, formation of a cloud of decomposition products, formation and propagation of a shock wave in air. The numerical calculation of the experiment [1] showed a good agreement with the obtained pressure profiles.

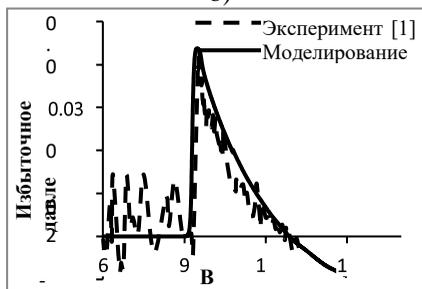
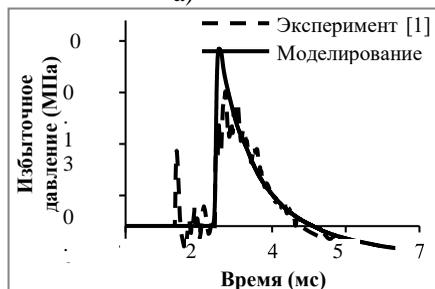
Численное моделирование осуществляется в два этапа. На первом этапе методом SPH осуществляется моделирование разложения высокоэнергетических соединений, деформация и разгон металлического корпуса и образование облака продуктов распада. Для описания высокоэнергетических соединений используется уравнение состояния в форме JWL полученные с помощью термодинамического кода TDS [2].

На втором этапе происходит смена численного метода и расчет продолжается методом Годунова-Колгана. При численном моделировании используется расчетный модуль, хорошо зарекомендовавший себя при моделировании распространения ударных волн [3]. Проведенный численный расчет эксперимента [1] показал хорошее согласие полученных данных, рис. 1.



a)

b)



c)

d)

Рис. 1 Профиль ударной волны на расстояниях а – 1 м, б – 2 м, в – 2.8 м, д – 5.8 м

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания №0723-2020-0036).

Список литературы

1. Alan P. Ohr, Seung J. Lee. Measured airblast environment from an explosive charge having a scored metal casing // 19th International Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, held 2-6 October 2006 in Calgary, Canada
2. Victorov, S.B., El-Rabii, et. all. An accurate Equation-of-state model for thermodynamic calculations of chemically reactive carbon-containing systems // Journal of Energetic Materials, 2010, 28(SUPPL. 1), с. 35-49.
3. Shargatov V.A. Chuganova A.P., Gorkunov S.V., Sumskoii S.I. Flow Structure behind a Shock Wave in a Channel with Periodically Arranged Obstacles// Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics, 2018, v. 300, P. 216–228

Л. И. ГРИШИН^{1,3}, А. Ю. ДОЛГОБОРОДОВ^{1,2,3}, В. Г. КИРИЛЕНКО²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия ²
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва

³Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва

ИМПУЛЬСНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ НАНОТЕРМИТОВ ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ

В работе проведены экспериментальные исследования лазерного инициирования и горения нанотермитов на основе алюминия и оксидов металлов. Для получения композиций использовалось ультразвуковое смешение наноразмерных порошков. Также изучалось влияние добавления сажи на пороговые параметры лазерного импульса. На основании полученных результатов были выдвинуты предположения относительно механизма зажигания нанотермитов лазерным излучением. Также были сделаны предположения о двухстадийном процессе инициирования реакции и механизме струйного горения пористых нанотермитов.

L.I. GRISHIN^{1,3}, A.YU. DOLGOBORODOV^{1,2,3},

V.G. KIRILENKO²,

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

²N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow

³Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow

IGNITION OF NANOTHERMITES BY A LASER DIODE PULSE

Experimental studies of laser initiation and combustion of nanothermites based on aluminum and metal oxides are carried out in this work. To obtain the compositions, ultrasonic mixing of nanosized powders was used. The effect of adding soot on the threshold parameters of the laser pulse was also studied. Based on the results obtained, assumptions were made regarding the mechanism of ignition of nanothermites by laser radiation. Also, assumptions were made about a two-stage process of initiation of the reaction and the mechanism of jet combustion of porous nanothermites.

Проведено исследование инициирования нанотермитов на основе алюминия и оксидов металлов Al / CuO, Al / Bi₂O₃ и Al / MoO₃

лазерным импульсом с длиной волны 808 нм с использованием малогабаритного лазерного диодного модуля. Экспериментальная установка позволяла создавать на поверхности образца импульсы с плотностью мощности до 770 Вт / см² и временем нарастания около 600 мкс. Эффективная площадь поперечного сечения балки составляла 0,426 мм².

Экспериментально подтверждено, что увеличение коэффициента теплопроводности материала мишени на три порядка влияет на скорость развития реакции после инициирования. Так, замена текстолитовой мишени на медную привела к снижению скорости горения на ≈ 100 м/с. Пороговые значения энергии при этом не изменились.

Измерения скорости горения нанотермита Al / CuO показали сильную зависимость от пористости. Скорость горения резко падает при уменьшении пористости, которая варьировалась от 90% до 50%.

Лазерное излучение не влияет на скорость горения. Реакция после инициирования распространяется независимо от наличия или отсутствия лазерного излучения.

Добавление 1% сажи к нанотермиту Al / CuO позволило почти вдвое снизить как задержку, так и критическую энергию инициирования.

Анализ хронограмм излучения, записанных с фронтальной поверхности образцов, позволил предположить, что реакция развивается в два этапа. На первом этапе реакция иницируется на поверхности, а на втором – она перерастает в прослой с последующим рассеянием продуктов.

В.Ф. ЛОМАДУРОВ, Т.В. ГУБИНА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ИССЛЕДОВАНИЕ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ НИТРАТ
ЦЕЛЛЮЛОЗЫ – НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ
МЕТОДОМ ШИРОКОУГЛОВОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ
ДИФРАКТОМЕТРИИ**

Рассмотрено влияние жесткоцепных макромолекул нитрата целлюлозы на специфические прочностные характеристики бинарной системы нитрата целлюлозы с низкомолекулярным соединением. Показано, что нитрат целлюлозы образует с данным низкомолекулярным соединением твердый раствор.

V.F. LOMADUROV, T.V. GUBINA

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

**RESEARCH OF THE BINARY SYSTEM OF CELLULOSE NI-
TRATE - LOW MOLECULAR WEIGHT COMPOUND BY THE
METHOD OF WIDE ANGLE X-RAY DIFFRACTOMETRY**

The influence of rigid-chain cellulose nitrate macromolecules on the specific strength characteristics systems based on the binary system cellulose nitrate - low molecular weight compound is considered. It was shown that cellulose nitrate forms a solid solution with this low molecular weight compound.

Рентгенографические исследования бинарных систем нитрат целлюлозы (НЦ) - низкомолекулярное соединение (НМС) проводились на отечественном дифрактометре ДРОН-2,0 при схеме съемки дифрактограммы на отражение с использованием излучения $Co\ K\alpha$, монохроматизированного железным фильтром в сканирующем режиме в диапазоне углов дифракции 2θ от 13.2° до 69° . Для изготовления бинарных систем НЦ-НМС использовались образцы НЦ с содержанием азота 12.1% и 13.0%. Степень кристалличности обоих исходных образцов НЦ составила, соответственно, 82% и 83%.

Дифрактограмма образцов материалов (рис.1), изготовленных на основе системы НЦ-НМС, показывает специфическую возможность получения монолитной гомогенной структуры с сохранением характерных признаков отражения рентгеновских лучей от областей НЦ, в которых наблюдаются упорядоченное расположение макромолекул НЦ.

Изменение структуры НЦ в исследуемой бинарной системе оценивалось по изменению межплоскостного расстояния d_{110} в кристаллографическом направлении (110) (рис.2). Как видно из рис.2, значение d_{110} с увеличением концентрации низкомолекулярного соединения растет как для НЦ ($N=12.1$), так и для НЦ ($N=13.0$). Поэтому можно утверждать, что при массовой доле НМС в бинарной системе НЦ- НМС не более 50% образуется твердый раствор [1].

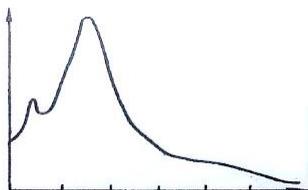


Рис.1. Дифрактограмма бинарной системы НЦ-НМС при массовых долях компонентов НЦ($N=12.1$):НМС=70:30

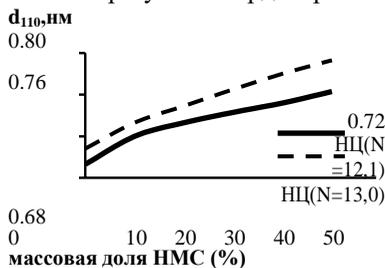


Рис. 2. Концентрационная зависимость межплоскостного расстояния d_{110}

кристаллографическом направлении (110) НЦ в бинарных системах НЦ-НМС

в

Слабовыраженное влияние содержания азота в НЦ на концентрационные зависимости значений d_{110} НЦ (рис.2) указывает на возможность получения материалов на основе НЦ ($N=13.0$)-НМС с достаточно высоким уровнем прочностных характеристик.

Ориентация жестких макромолекул НЦ вдоль направления действия механического поля приводит к ярко выраженной анизотропии физико-механических свойств материалов на основе НЦ-НМС. Так, прочностные характеристики вдоль оси прессования примерно в 2 раза выше, чем в тангенциальном направлении. Также ориентация жестких макромолекул НЦ приводит к большим абсолютным значениям прочности на разрыв в продольном направлении и меньшей эластичности конденсированных систем на основе НЦ-НМС.

Таким образом, образование твердого раствора в бинарной системе НЦ-НМС определяет прочностные характеристики материалов на основе НЦ-НМС.

Список литературы

1. Свиридов А.Ф., Мясникова Р.М., Титова Е.Ф., Цванкин Д.Я., Перцин А.И. // Кристаллография. 1984. Т. 29, Вып. 2. С. 247–251.

В.Ф. ЛОМАДУРОВ, Т.В. ГУБИНА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ АМОРФНОСТИ НИТРАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Для характеристики структуры нитрата целлюлозы предложен количественный показатель - степень аморфности. Значения степени аморфности нитрата целлюлозы получают в результате анализа функции радиального распределения атомов нитрата целлюлозы.

V.F. LOMADUROV, T.V. GUBINA

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

MEASURING THE DEGREE OF AMORPHOUSNESS NITRATE CELLULOSE

To characterize the structure of cellulose nitrate, a quantitative indicator is proposed - the degree of amorphousness. The values of the degree of amorphousness of cellulose nitrate are obtained by analyzing the radial distribution function of cellulose nitrate at- oms.

Определение количественных характеристик структуры нитрата целлюлозы (НЦ) в результате анализа данных рентгенографического анализа затруднено вследствие существенного размытия дифракционных пиков НЦ, их наложении друг на друга, субъективных методик выделения из дифрактограммы НЦ аморфного гало.

Для веществ с размером области когерентного рассеяния r_s порядка несколько нанометров, можно вычислить функцию радиального распределения атомов $g(r)$ и оценить расстояние, на котором исчезает корреляция в расположении атомов [1]. При значениях межатомного расстояния r меньше некоторого значения r_s функция $g(r)$ флуктуирует около единицы, эти флуктуации отражают ту упорядоченность, которая характеризует расположение атомов/мотивов (группы атомов) в веществе. При значениях r больше некоторого значения r_s расположение атомов/мотивов (группы атомов) в веществе, например с неупорядоченной структурой, становится случайным, и функция $g(r)$ стремится к единице [1].

Экспериментальное значение функции радиального распределения атомов/мотивов (группы атомов) $g(r)$ в случае однородных и изотропных тел определялась по формуле [1]:

∞

$$g(r) = 1 + (1/(2\pi 2\rho_0 r)) \int_0^\infty s \cdot [J(s) - 1] \cdot \sin(sr) ds$$

где r – межатомное расстояние, λ – длина волны излучения, $J(s)$ – нормированная функция интенсивности когерентного рассеяния, ρ_0 – средняя атомная плотность в единице объём, $s=4\pi \cdot \sin(\theta)/\lambda$.

Величина расстояния r_s , на котором исчезает корреляция в расположении атомов, зависит от точности определения $g(r)$, при значениях которых осцилляцией $g(r)$ около единицы можно пренебречь. Для нитратов целлюлозы, применяемых при производстве энергетических материалов, предлагается пренебрегать осцилляциями функции распределения при $g(r) = 1 \pm 0,1$.

С помощью значений r_s можно рассчитать максимальный линейный размер области НЦ, в котором имеется корреляция в расположении атомов, $D_s = 2 \cdot r_s$.

Анализ расчетных дифрактограмм НЦ дает следующие значения. Расстояние $r_s = 10.95 \text{ \AA}$, максимальный линейный размер области составляет $D_s = 21.9 \text{ \AA}$ и его объём $V_s = 5500 \text{ \AA}^3$

По аналогии с количественным описанием структуры аморфных

металлических сплавов [2] для количественного описания структуры НЦ представляется интересным использовать значение степени аморфности нитрата целлюлозы. Для НЦ степень аморфности может быть рассчитана из соотношения R/r_s , где в качестве R можно использовать длину виртуальной связи О1-О4 глюкопиранозного кольца $5,43 \text{ \AA}$ или минимальное расстояние между макромолекулами НЦ в элементарной ячейки НЦ $7.6 - 7.7 \text{ \AA}$. Так, при значении $R = 7.6 \text{ \AA}$ получено значение степени аморфности 0.69 или 69% .

Таким образом, для количественного описания структуры НЦ предложен параметр, расчет которого из данных рентгеновского эксперимента не предусматривает выделения из регистрируемой интенсивности рассеяния рентгеновских лучей рассеяния аморфной составляющей.

Список литературы

1. Мороз Э.М. // Успехи химии. 2011. 80 (4) С. 315-334.
2. Калин Б.А., Севрюков О.Н., Сучков А.Н., Тенишев А.В. Изучение фазовых превращений в аморфных материалах методом ДСК: Лабораторный практикум - М.: МИФИ, 2008. - 40 с.

С.А. ГУБИН¹, С.Х. ЗАЙНЕТДИНОВ², С.И. СУМСКОЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН С НЕСКОЛЬКИМИ ЗВУКОВЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ

В работе рассматриваются результаты газодинамического моделирования течения за детонационной волной при изменении скорости звука. Полученные в расчете параметры полностью совпадают с предсказанными ранее в теоретических исследованиях.

S.A. GUBIN¹, S.KH. ZAINETDINOV², S.I.SUMSKOI¹

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

²ZAO STC PB, Moscow, Russia

GAS-DYNAMIC MODELING OF DETONATION WAVES WITH SEVERAL SOUND PLANES

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.

Теория возмущений позволяет получать термические уравнения состояния (УРС) веществ, которые реалистично описывают их свойства в широком диапазоне давлений и температур. Теория возмущений применима к любым газообразным или конденсированным системам, в которых имеются взаимодействия, описываемые парным сферически-симметричным потенциалом.

В предыдущих работах на примере идеального газа с переменной теплоемкостью, исходя из общих законов сохранения, было показано, что в волне разрежения за детонационной волной в результате изменения теплоемкости и при определенном отводе тепла могут возникать дополнительные (отличные от ЧЖ) звуковые плоскости [1-3]. В данной работе в соответствующей постановке впервые были выполнены газодинамические расчеты процесса распространения детонационной волны, в продуктах которой имеет место изменение скорости звука.

Расчеты подтвердили возможность существования дополнительных(к плоскости ЧЖ) звуковых плоскостей.

В работе приводятся результаты расчета таких течений. Для них расчетным путем показана возможность существования детонационных волн, в которых теплоподвод в зоне реакции может быть уравновешен теплоотводом из зон между звуковыми плоскостями.

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. Т. 72. С. 324.
3. Губин С.А., Сумской С.И. // Сборник: V Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" ЛаПлаз-2019. сборник научных трудов. 2019. С. 331-332.
4. S I Sumskoj et al // 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1686 012085

М.Ш. КУРБАНОВ¹, У.М. НУРАЛИЕВ¹,
С.А. ГУБИН², А.В. КУДИНОВ², И.В. МАКЛАШОВА²

¹*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан*

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

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАНА

На основе анализа результатов равновесных термодинамических расчетов найден диапазон значений массового содержания твердого диоксида кремния (% m SiO₂) для получения высоких значений массовых долей жидкого кремния, образующегося при пиролизе смеси конденсированного угля и газообразного метана при атмосферном давлении. Расчетные значения этого диапазона массового содержания диоксида кремния согласуются с полученными экспериментальными данными.

M.S. KURBANOV¹, U.M. NURALIEV¹, S.A. GUBIN², A.V. KUDINOV²,
I.V. MAKLASHOVA²

¹*Arifov institute of ion-plasma and laser technologies of Uzbekistan Academy of Science,
Tashkent, Uzbekistan*

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

THERMODYNAMIC CALCULATION OF CARBOTHERMIC REDUCTION OF SILICON USING METHANE

Based on the analysis of the equilibrium thermodynamic calculation results, a range of values of the solid silicon dioxide (%m SiO₂) mass content is found for obtaining high values of the mass fractions of liquid silicon formed during pyrolysis of a condensed coal and methane gas mixture at atmospheric pressure. The calculated values of this range of the silicon dioxide mass content are consistent with the experimental data obtained.

Известно, что металлический кремний производят в электрических печах восстановлением диоксида кремния углеродом. Одна из основных проблем в этом процессе является дефицитность, дороговизна и низкие физико-химические и металлургические свойства применяемых углеродистых восстановителей (древесный уголь и его заменители).

Для экспериментального изучения возможности использования метана совместно с конденсированным углеродом для получения металлического кремния была использована специально созданная электродуговая печь постоянного тока мощностью 130 кВт, в горне которой обеспечено поступление

метана непосредственно в зону высокой температуры через верхний полый графитовый электрод. В качестве углеродистых восстановителей использовался метан – до 80% от общего необходимого количества углерода и 20 % твердый углерод, состоящий из древесного угля и нефтяного кокса.

Расчет образования жидкого кремния из SiO_2 при пиролизе смесей, состоящих из конденсированного угля и газообразного метана, проведен при атмосферном давлении с помощью термодинамического кода TDS [1].

Расчеты показывают, что жидкий кремний образуется при разложении SiC(тв) . Образующийся углерод окисляется кислородом от разложения газообразного SiO с образованием CO . Поэтому с ростом увеличения массового количества Si(ж) концентрация CO растет, а SiC(тв) и SiO снижается. Результаты расчетов согласуются с данными промышленных испытаний выплавки кремния, проводимых в руднотермической печи мощностью 6,5 МВт [2]. В тоже время по результатам расчетов расход газообразного SiO составляет всего ~41% от общего образованного количества, а остальная часть SiO ~60%, не вступает в реакцию и покидает зону реакции с отходящими газами, что подтверждается данными [3].

Для получения зависимости максимального выхода Si от массового содержания SiO_2 рассмотрен интервал массовых количеств диоксида кремния 66 %m – 76 %m при пиролизе SiO_2 в смеси конденсированного углерода и газообразного CH_4 для температур 2200 К – 2900 К и давления 1 атм. Расчетами показано, что значения SiO_2 вне этого интервала не приводят к увеличению содержания кремния в продуктах.

На основе анализа результатов равновесных термодинамических расчетов найден диапазон значений массового содержания твердого диоксида кремния (69 %m – 73 %m SiO_2) для получения высоких значений производства жидкого кремния. Этот диапазон соответствует массовым количествам SiO_2 в реагентах, при которых замена конденсированного углерода метаном ведет к увеличению массового выхода жидкого кремния. Расчетные значения этого диапазона массового содержания диоксида кремния согласуются с полученными экспериментальными результатами.

Список литературы

1. Victorov S B, EL-Rabii H, Gubin S A, et al. 2010 *J. Energ. Mat.* 28 35.
2. К.С. Ёлкин, М.Ш. Курбанов, Д.К. Ёлкин. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Перспективы инновационного развития горно-металлургического комплекса», г. Навои, 22 ноября 2018 года, стр. 233-234.
3. Катков О.М. Выплавка технического кремния. Иркутск: изд-во ИрГТУ, 1999, 243 с.

Н.Н. СЕРЕДКИН^{1,2}, К.В. ХИЩЕНКО^{2,3,4}

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

² *Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН), Москва, Россия*

³ *Московский физико-технический институт (МФТИ), Московская область, Россия*

⁴ *Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СМЕСЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

В данной работе мы рассчитываем ударные адиабаты для смесей различных материалов. Расчет основан на методе аддитивности ударных адиабат компонентов. Согласно данному методу при заданном давлении ударного сжатия удельный объем ударно-сжатой смеси является суммой удельных объемов ударно-сжатых компонентов смеси с учетом их массовой доли. Результаты этого расчета ударных адиабат сравниваются с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов для двухкомпонентных смесей и сплавов при высоких давлениях.

N.N. SEREDKIN^{1,2}, K.V. KHISHCHENKO^{2,3,4}

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

² *Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³ *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Russia*

⁴ *South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

CALCULATION OF SHOCK ADIABATS OF MIXTURES AT HIGH PRESSURES

In this work, we calculate the shock adiabats for mixtures of different materials. The calculation is based on the additivity method of shock adiabats of components, according to which, at a given shock compression pressure, the specific volume of the shock-compressed mixture is the sum of the specific volumes of the shock-compressed components of the mixture, taking into account their mass fractions. The results of this calculation of shock adiabats are compared with the available data of shock-wave experiments for two-component mixtures and alloys at high pressures.

В аддитивном приближении объем ударно-сжатой смеси предполагается равным сумме объемов компонентов, полученных при том же давлении, при их реальном ударном сжатии в виде гомогенных монолитных образцов.

Это условие выражается соотношением:

$$V_{12}(p) = \alpha_1 V_1(p) + \alpha_2 V_2(p) \quad (1)$$
 Здесь 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 тяжелого компонента найти адиабату легкого компонента.

Обратимся к условиям, определяющим точность аддитивного приближения. Результаты динамических экспериментов устанавливают зависимость удельного объема смеси от давления и для каждого $p - V_{12}$ – состояния определяют удельную энергию сжатия:

$$\varepsilon_{12} = 1/2 p (V_{120} - V_{12})$$

Последнее уравнение может быть записано в форме

$$\alpha \varepsilon_1^* + \alpha \varepsilon_2^* = p [\alpha (V_{10} - V_1^*) + \alpha (V_{20} - V_2^*)] \quad (2)$$

Здесь ε_1^* и ε_2^* - удельные энергии сжатия компонентов, приобретенные при сжатии смеси, V_1^* и V_2^* - их удельные объемы в тех же условиях, V_{10} и V_{20} – их начальные удельные объемы.

Условие аддитивности требует соблюдения дополнительно к уравнению (2) полученных равенств

$$\varepsilon_1^* = p (V_{10} - V_1^*), \quad \varepsilon_2^* = \frac{1}{2} p (V_{20} - V_2^*) \quad (3)$$

совпадающих с уравнениями Гюгонио отдельных компонентов. При этом, как следует из системы (2), (3), справедливость одного из уравнений (3), одновременно свидетельствует о выполнении при сжатии смеси уравнения Гюгонио и для другого компонента.

С.А. ГУБИН¹, А.М. СВЕРЧКОВ², С.И. СУМСКОЙ¹

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

²*ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия*

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОУДАРОВ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ КАВИТАЦИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ В ТРУБОПРОВОДЕ

Было проведено моделирование гидроудара в трубопроводе с перепадом высот. Показано, что в такой системе возникают области кавитации. При схлопывании таких областей образуются мощные волны давления

S.A. GUBIN¹, A.M. SVERCHKOV², S.I. SUMSKOI¹

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

²*ZAO STC PB, Moscow, Russia*

OCCURRENCE OF LOCAL WATER HAMMER DURING COLLAPSE OF CAVITATION REGION IN A PIPELINE SYSTEM

Simulation of a water hammer in a pipeline with a height difference was carried out. It is shown that cavitation regions appear in such system. When such regions collapse, powerful pressure waves are formed.

С использованием разработанных ранее подходов [1-5] было выполнено исследование нестационарного процесса при быстрой остановке потока на выходе трубопровода. Такая ситуация может возникнуть на объектах перевалки нефти и нефтепродуктов [6]. Показано, что в местах изменения уклона (излом трассы) возможно образование зон кавитации (областей с одновременным нахождением пузырьков пара в жидкости). При схлопывании таких областей в результате встречного движения сплошных столбов жидкости и их последующего столкновения и торможения возникают ударные волн / волн сжатия в случае кавитации и последующего схлопывания кавитационных зон.

В работе приводятся результаты расчета таких процессов. Показано, что возникающие при этом давления заметно отличаются (в большую сторону) от давлений, рассчитываемых без учета кавитаций.

Список литературы

1. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M. // *Physics Procedia*. 2015. С. 347-350.
2. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M. // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1696,

012026

3. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M., Lisanov M.V., Egorov A.F. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 751. № 1. С. 012022.
4. Sumskoi S.I., Sofin A.S., Lisanov M.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 751. № 1. Р. 012025.
5. Губин С.А., Губина Т.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 10. С. 66-71.
6. 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. 33-37.

Е. С. ГОНЧАРОВ, Г. В. КОЛОМИЙЦЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕНИЙ В ВИДЕ БЕГУЩИХ ВОЛН
УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА – ДЕ ВРИЗА – БЮРГЕРСА С
КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИЕЙ ПОТОКА**

В работе рассмотрены свойства решений уравнения Кортевега-де Вриза- Бюргерса в виде бегущих волн. Исследован характер поведения особых разрывов со стационарной структурой в зависимости от параметра диссипации для случая, когда функция потока имеет линейно-кусочный вид.

E.S. GONCHAROV, G.V. KOLOMIYTSEV

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

**INVESTIGATION OF TRAVELLING WAVE SOLUTIONS OF
KORTEVEG – DE VRIES – BURGERS EQUATION WITH
PIECEWISE LINEAR FLOW FUNCTION**

Properties of travelling-wave solutions of the Kortevæg - De Vries - Burgers equation are considered. In the case of piecewise linear flow function, the dependence of special solutions with stationary structure behavior on dissipation parameter is investigated.

Уравнения типа Кортевега – де Вриза – Бюргерса с различными функциями потока и членами, отвечающими за дисперсию и диссипацию волн, возникают в множестве задач механики сплошной среды, в частности, в задачах о распространении бегущих волн в упругих средах.

В работе на примере простейшей немонотонной функции потока, заданной в кусочно-линейном виде, рассмотрены свойства решений уравнения в виде бегущих волн. Исследован характер поведения особых разрывов со стационарной структурой, т.е. решений, соответствующих сепаратрисам фазового пространства, в зависимости от параметров диссипации и дисперсии. Обсуждаются структура фазового пространства рассматриваемой динамической системы и условия возникновения особых разрывов. Численно установлены критические параметры диссипации и дисперсии, при которых возникают решения такого типа.

Полученные результаты сравниваются с полученными ранее аналитическими решениями задачи.

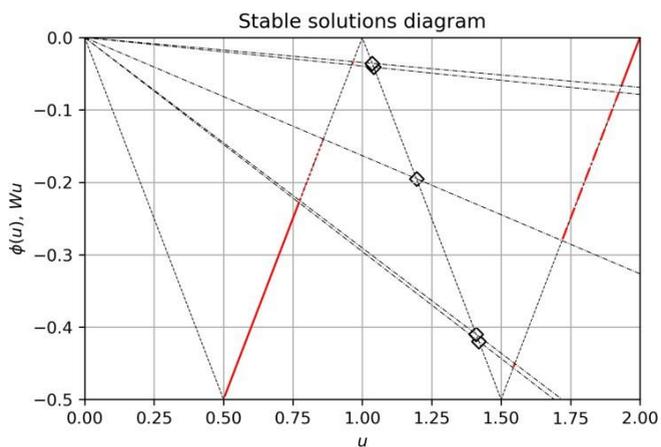


Рис. 1 Карта пространства устойчивых решений.

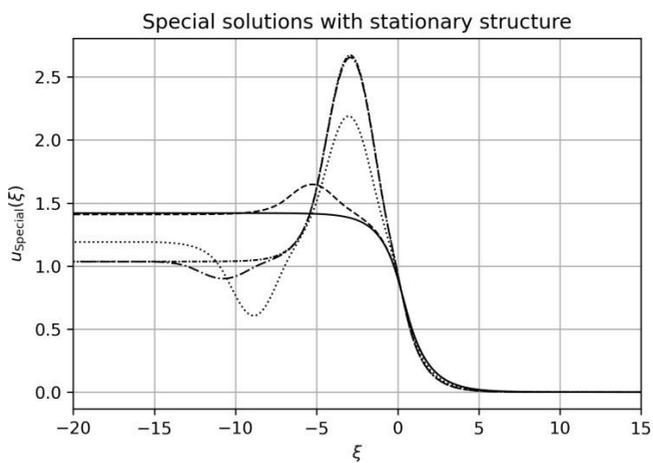


Рис. 2 Частные решения обладающие стационарной структурой.